



UCA

Universidad
de Cádiz

Estudio del proceso de rectificado cilíndrico de la
aleación aeronáutica UNS R56400

Julio 2017

TRABAJO FIN DE GRADO



Fernando
Sánchez
Artola

Grado en Ingeniería Aeroespacial
TRABAJO FIN DE GRADO

D. Fernando Sánchez Artola

Directores: D. Severo Raúl Fernández Vidal / D. Fco. Javier Puerta Morales

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA
GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL.

**ESTUDIO DEL PROCESO DE RECTIFICADO
CILÍNDRICO DE LA ALEACIÓN
AERONÁUTICA UNS R56400**

AUTOR: FERNANDO SÁNCHEZ ARTOLA

Cádiz, julio 2017

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA
GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL.

**ESTUDIO DEL PROCESO DE RECTIFICADO
CILÍNDRICO DE LA ALEACIÓN
AERONÁUTICA UNS R56400**

DIRECTORES: SEVERO RAÚL FERNÁNDEZ VIDAL
FCO. JAVIER PUERTA MORALES
AUTOR: FERNANDO SÁNCHEZ ARTOLA

Cádiz, julio 2017



Índice General

ÍNDICE GENERAL

Índice de contenido

MEMORIA

1. Alcance y objetivo	5
2. Contexto y justificación del trabajo	7
2.1. El sector aeronáutico.....	7
2.1.1. Actividad aeronáutica en el mundo	8
2.1.2. Actividad aeronáutica en España	11
2.1.3. Actividad aeronáutica en Andalucía.....	16
2.2. Materiales empleados en la aeronáutica.....	19
2.2.1. Materiales compuestos.....	21
2.2.2. Superaleaciones	21
2.2.3. Aceros.....	22
2.2.4. Aluminio	22
2.2.5. Titanio.....	24
2.3. Crecimiento del rectificado	25
2.4. Grupo TEP-027 UCA.....	27
3. Aleaciones de Titanio y aplicación en la aeronáutica	30
3.1. Introducción	30
3.2. Propiedades generales del titanio.....	31
3.3. Tratamientos térmicos y aleaciones	35
3.3.1. Aleación Ti-6Al-4V	36
3.4. Aleaciones de titanio para aplicaciones aeronáuticas	38
3.4.1. Aleaciones de titanio para aeronaves	38
3.4.2. Estructura	39
3.4.3. Turbina de gas	42
3.4.4. Helicópteros	45
3.4.5. Espacio.....	45
4. Mecanizado por arranque de virutas.....	47
4.1. Mecanizado de titanio por arranque de viruta	47
4.2. Torneado de titanio.....	48

ÍNDICE GENERAL

4.2.1 Mecanismos de desgaste en torneado	50
4.2.2 Torneado en seco	51
5. Procesos de mecanizado abrasivo	53
5.1. Bruñido.....	54
5.2. Lapeado	55
5.3. Pulido.....	57
5.4. Abrillantado.....	57
6. Rectificado.....	58
6.1. Formación de viruta	60
6.2. Fuerzas de rectificado	62
6.3. Energía específica	63
6.4. Temperatura.....	64
6.4.1. Revenido.....	65
6.4.2. Quemado.....	65
6.4.3. Agrietamiento por calor	65
6.4.4. Tensiones residuales	66
6.5. Discos de rectificado	67
6.5.1. Abrasivos	70
6.5.2. Aglomerantes	71
6.5.3. Mecanismos de desgaste	73
6.5.4. Diamantado de discos	76
6.6. Tipos de rectificado	77
6.6.1. Rectificado plano.....	78
6.6.2. Rectificado cilíndrico	79
6.6.3. Rectificado sin centros	81
6.6.4. Rectificado de avance lento	81
6.6.5. Rectificado para eliminar grandes cantidades de material.....	82
6.7. Máquinas rectificadoras.....	83
6.7.1. Rectificadora planeadora	83
6.7.2. Rectificadora cilíndrica de exteriores.....	84
6.7.3. Rectificadora cilíndrica de interiores.....	85
6.7.4. Rectificadora sin centros	85
6.7.5. Rectificadora de herramienta universal.....	86

ÍNDICE GENERAL

6.8. Fluidos de rectificado	86
6.9. Consideraciones de diseño para el rectificado	88
6.10. Rectificado de Ti	89
6.10.1. Introducción	89
6.10.2. Propiedades de los discos para el rectificado de titanio.....	90
6.10.3. Condiciones de operación	91
6.11. Comparación del rectificado con otros procesos de corte	93
7. Evaluación de la integridad superficial.....	96
7.1. Microgeometría.....	96
7.2. Macrogeometría.....	99
7.2.1. Cilindricidad.....	99
7.2.2. Redondez.....	100
7.2.3. Rectitud	101
7.3. Microdureza	101
8. Metodología experimental.....	104
8.1. Protocolo de ensayos	104
8.1.1. Preparación de la probeta.....	104
8.1.2. Torneado	106
8.1.3. Rectificado.....	110
8.2. Identificación de ensayos.....	119
8.3. Metrología.....	120
8.3.1. Microgeometría.....	120
8.3.2. Macrogeometría.....	123
8.3.3. Microdureza	126
9. Resultados y discusión	130
9.1. Resultados de microgeometría	130
9.2. Resultados de macrogeometría	136
9.3. Resultados de microdureza	147
10. Conclusiones y líneas futuras	151
10.1. Conclusiones	151
10.1.1. Microgeometría.....	151
10.1.2. Macrogeometría.....	153
10.1.3. Microdureza	154

ÍNDICE GENERAL

10.2. Propuestas de mejora	156
10.3. Líneas futuras	157
11. Referencias bibliográficas	158

ANEXOS

ANEXO I	166
Guía simple sobre las aleaciones de titanio y sus aplicaciones	
ANEXO II	168
Propiedades mecánicas de los grados ASTM	
ANEXO III	169
Elementos estabilizadores para fases α y β para titanio	
ANEXO IV	170
Procesos de mecanizado para aleaciones de titanio	
ANEXO V	172
Tabla de especificaciones y parámetros principales de la rectificadora RCE750	
ANEXO VI	174
Gráfico de elementos de funcionamiento de la rectificadora RCE750	
ANEXO VII	178
Tabla resumen e informes de resultados de rugosidad	
ANEXO VIII	244
Tabla resumen e informes de resultados de macrogeometría	
ANEXO IX	294
Tabla resumen de resultados de microdureza	

PLIEGO DE CONDICIONES

1. Condiciones generales.....	300
2. Condiciones particulares	300
2.1. Requisitos humanos	300
2.2. Requisitos tecnológicos	301
2.3. Otros requisitos	303
3. Condiciones económicas	303
3.1. Forma de pago	303
3.2. Cumplimiento de los plazos y penalizaciones	303
3.3. Garantía	304
3.4. Limitación	304
4. Condiciones legales	304

ÍNDICE GENERAL

ESTADO DE MEDICIONES

1. Fases de desarrollo del proyecto	310
1.1. Preparación de los ensayos	310
1.2. Realización de los ensayos	310
1.3. Elaboración documento	311

PRESUPUESTO

1. Precios unitarios	316
2. Desglose presupuestario	317
2.1. Preparación de los ensayos	317
2.2. Realización de los ensayos	317
2.3. Elaboración del documento	317
3. Presupuesto final	318

ÍNDICE GENERAL

Índice de figuras

Figura 2.1. Demanda y producción de aeronaves comerciales desde 1980 hasta 2013. En el eje de abscisas se encuentra el tiempo en años y en el de ordenadas el número de aviones	9
Figura 2.2. Vista general de la industria aeroespacial del año 2014, adaptada de referencia	11
Figura 2.3. Primer vuelo en aeroplano en la historia de España	11
Figura 2.4. Peso de la facturación en el sector aeroespacial de las principales Comunidades Autónomas	14
Figura 2.5. Estructura del sector aeronáutico	15
Figura 2.6. Distribución de empresas del sector aeroespacial andaluz según su actividad principal, adaptada de referencia	17
Figura 2.7. Ensamblaje final del A400M	18
Figura 2.8. Estabilizador horizontal o HTP (izquierda) y Belly fairing (derecha) del A350 XWB	18
Figura 2.9. Distribución de pesos de un avión comercial (adaptada de referencia)	20
Figura 2.10. Composición de la aeronave A350 XWB de Airbus® (izquierda) y de la aeronave B787 de Boeing® (derecha). Adaptada de referencia	20
Figura 2.11. Aproximación del porcentaje en peso de los principales materiales usados en el Boeing 767, 777 y 787 (adaptada de referencia)	23
Figura 2.12. Cantidad en toneladas de titanio utilizado en diferentes modelos de avión	24
Figura 2.13. Partes del A380 fabricadas en titanio	25
Figura 2.14. Número aproximado de publicaciones sobre el rectificado desde 1985	25
Figura 2.15. a) Materiales más empleados en el rectificado y b) Metales más comunes	26
Figura 2.16. Pronóstico de la demanda mundial de titanio para aeronaves (adaptada de referencia)	27
Figura 2.17. Evolución del titanio rectificado dentro del sector aeronáutico	27
Figura 3.1. Esquema de un diagrama de fase en tres dimensiones de las aleaciones de titanio	34
Figura 3.2. Micrografías ópticas de probetas de la aleación de titanio Ti-6Al-4V oxidadas en aire durante diferentes intervalos de tiempo	36
Figura 3.3. Porcentaje de aluminio, titanio, aceros y materiales compuestos CFRP en peso estructural tanto para la estructura del avión como para la planta motora (adaptada de)	39
Figura 3.4. Porcentaje, en relación al peso en vacío, de titanio en aviones comerciales de Boeing (adaptado de referencia)	40
Figura 3.5. Componente del tren de aterrizaje principal de un B777 fabricado en TIMETAL 10-2-3 (Ti-10V-2Fe-3Al)	41
Figura 3.6. Marcos de las lunas correspondientes a la cabina de un avión comercial fabricada en Ti-6Al-4V	42
Figura 3.7. Porcentaje del peso total de motores Rolls-Royce correspondiente al titanio	43

ÍNDICE GENERAL

Figura 3.8. Frontal de los turbofans de motores Trent de Rolls-Royce hechos de Ti-6Al-4V	43
Figura 3.9. Esquema de componentes pertenecientes a un turbofan	44
Figura 3.10. Desarrollo de las aleaciones de titanio en función de su temperatura máxima de servicio.....	44
Figura 3.11. Componentes de la cabeza de los rotores de los helicópteros BO105 y BK117 de Eurocopter fabricados en Ti6Al4V	45
Figura 3.12. Tanques presurizados hechos de titanio para el programa Shuttle de la NASA.	46
Figura 4.1. Geometría de una herramienta convencional de corte para torno.	49
Figura 5.1. Clasificación de los procesos abrasivos	54
Figura 5.2. Esquema de una herramienta para el bruñido	55
Figura 5.3. Proceso de bruñido exterior para una pieza cilíndrica	55
Figura 5.4. a) Esquema del proceso de lapeado, b) Lapeado de producción sobre superficies planas y c) Lapeado de producción sobre superficies cilíndricas	56
Figura 6.1. Proceso de rectificado y representación de la herramienta de corte	58
Figura 6.2. Superficie de un disco de rectificado que muestra los granos de abrasivo, la porosidad de la herramienta, el desgaste de los granos y virutas desprendidas de la pieza de trabajo	59
Figura 6.3. Esquema del proceso de rectificado de superficie plana, que muestra diversas variables del proceso. La figura ilustra el rectificado (a) plano y (b) cilíndrico. Adaptada de referencia	59
Figura 6.4. Profundidad real VS profundidad teórica	59
Figura 6.5. Imágenes SEM de virutas de mecanizado de una pieza de acero UNS G10650	61
Figura 6.6. Formación de la viruta y surcos de la superficie de trabajo debido al paso de un grano abrasivo	64
Figura 6.7. Distribuciones de tensiones residuales tras el rectificado de la aleación de acero FDMA (adaptada de referencia).....	67
Figura 6.8. Representación esquemática de una herramienta de corte que muestra su estructura, desgaste y fractura (adaptada de referencia).....	68
Figura 6.9. Esquemas de tipos de discos de rectificado más comunes. El color grisáceo de las imágenes representa la zona abrasiva de la herramienta.	68
Figura 6.10. Sistema estándar para la denominación de discos de abrasivo convencional	69
Figura 6.11. Sistema estándar para la denominación de discos de superabrasivo.....	69
Figura 6.12. Mecanismos de desgastes en los discos de rectificado	73
Figura 6.13. Imagen SEM de una disco de rectificado donde se aprecia desgaste por atrición y por embotamiento	75
Figura 6.14. Relación de rectificado como parámetro de medida del desgaste	75
Figura 6.15. Barras abrasivas de SiC de aplicación manual.....	76
Figura 6.16. Parámetros de diamantado	77
Figura 6.17. Variantes del rectificado plano: a) Longitudinal periférico, b) longitudinal lateral, c) Giratorio periférico y d) Giratorio lateral	79
Figura 6.18. Parámetros del rectificado plano	79

ÍNDICE GENERAL

Figura 6.19. Tipos de rectificado cilíndrico: a) exterior longitudinal, b) exterior transversal, c) interior longitudinal y d) interior transversal .	80
Figura 6.20. Parámetros del rectificado cilíndrico: a) transversal (penetración) y b) longitudinal	80
Figura 6.21. Rectificado de roscas mediante rectificado: a) transversal y b) de penetración.	80
Figura 6.22. Esquema del rectificado sin centros (a) longitudinal y b) interno) y sus componentes (adaptada de referencia)	81
Figura 6.23. Esquema de una rectificadora de superficies planas con husillo horizontal y mesa alternativa	84
Figura 6.24. Rectificado por penetración de una pieza cilíndrica en una rectificadora cilíndrica con el disco afilado en forma escalonada (adaptada de referencia)	84
Figura 6.25. Esquema de una rectificadora cilíndrica universal	85
Figura 6.26. Rectificadora cilíndrica sin centros preparada para el rectificado en serie	86
Figura 6.27. Efecto de la lubricación en la temperatura y la velocidad de corte. La lubricación refrigerante prolonga la vida de la herramienta y aumenta la velocidad de corte posible	87
Figura 6.28. Imagen SOM de la calidad superficial obtenida mediante el rectificado en seco de la aleación Ti6Al4V	92
Figura 6.29. Efecto del tamaño de la viruta en la energía específica del proceso	94
Figura 6.30. Componentes de la fuerza en: a) torneado y b) rectificado.	95
Figura 7.1. Esquema del parámetro Ra. El término l_r es la medida de muestra, también conocida como cut-off.	97
Figura 7.2. Esquema de los parámetros R_z , $R_{z\max}$ y R_t	98
Figura 7.3. Esquema del parámetro R_p	98
Figura 7.4. Esquema del parámetro R_{sm}	99
Figura 7.5. a) Geometría del indentador y b) geometría de la huella	102
Figura 7.6. Geometría de la huella del indentador.	102
Figura 8.1. Sistema de corte waterjet TCI Cutting modelo BP-C 3020-1	105
Figura 8.2. Sujeción previa (izquierda) y mecanizado (derecha) de la barra de Ti6Al4V mediante AWJM	105
Figura 8.3. Comparación entre acabados, de la misma cara: a) tras mecanizado por AWJM y b) tras refrentado y avellanado.	106
Figura 8.4. Torno manual de marca ZUBAL® empleado en las operaciones previas al rectificado	107
Figura 8.5. Montaje de la pieza en el perrillo de arrastre	108
Figura 8.6. Alineación de la punta de la herramienta con el contrapunto	108
Figura 8.7. Ajuste de la probeta entre el cabezal y el contrapunto del torno	109
Figura 8.8. Diferenciación entre a) primer tramo y b) segundo tramo, mecanizados para una misma probeta	109
Figura 8.9. Cara de desprendimiento (2) y filos (1 y 3) de a) herramienta no usada y b) herramienta tras uso primer tramo. Zoom 3.0	110
Figura 8.10. Rectificadora cilíndrica RCE750	111
Figura 8.11. Imagen en detalle de uno de los tornillos hexagonales que anclan el cabezal a la mesa de trabajo	112
Figura 8.12. Sistema poleas-correa correspondiente al cabezal	112

ÍNDICE GENERAL

Figura 8.13. Colocación de la probeta entre el cabezal y el contrapunto.....	113
Figura 8.14. Representación final de las secciones rectificadas de la probeta	116
Figura 8.15. Depósito para el fluido de corte de la rectificadora RCE750	117
Figura 8.16. Colocación del diamantador monopunta respecto a disco de rectificado	118
Figura 8.17. Estado de la muela tras impacto recibido	119
Figura 8.18. Equipo Mahr Perthometer PGK 120.....	121
Figura 8.19. Disposición de las cuatro generatrices del cilindro.....	121
Figura 8.20. Realización de una medida de rugosidad sobre una de las probetas.....	122
Figura 8.21. Medidora de forma Mahr Formtester MMQ44	123
Figura 8.22. Proceso de centrado y nivelado de la probeta sobre la sección sin rectificar	124
Figura 8.23. Extracto de uno de los pasos seguidos por el software del equipo para el centrado de la probeta	125
Figura 8.24. Estado de la probeta y el palpador de forma durante una de las mediciones de redondez y cilindridad.	126
Figura 8.25. Microdurómetro modelo HVM-2ADW de marca SHIMADZU© empleado.....	126
Figura 8.26. Disposición de las tres generatrices del cilindro	127
Figura 8.27. Realización de una medida de microdureza Vickers sobre una de las probetas ..	127
Figura 8.28. Ejemplos de huellas obtenidas para la medición de la microdureza empleando el método Vickers	129
Figura 9.1. Valores de R_a en función de la profundidad a_e , para cada velocidad V_w	131
Figura 9.2 Valores de R_a en función de la velocidad V_w , para cada profundidad a_e	132
Figura 9.3. Comparación entre las evoluciones de R_a con la profundidad a_e para cada velocidad V_w	133
Figura 9.4. Comparación entre las evoluciones de R_a con la velocidad V_w para cada profundidad a_e	134
Figura 9.5. Acabado obtenido en las secciones rectificadas a $a_e = 20 \mu m$ para; a) $V_w = 60 \text{ r/min}$, b) $V_w = 170 \text{ r/min}$, c) $V_w = 230 \text{ r/min}$ y d) $V_w = 460 \text{ r/min}$. Zoom 3.0.....	135
Figura 9.6. Consideración del valor de R_a obtenido de [51] para $a_e = 20 \mu m$ y $V_w = 170 \text{ r/min}$ en las comparativas de Figura 9.3 y Figura 9.4.	136
Figura 9.7. Valores de redondez en función de la profundidad a_e , para cada velocidad V_w	137
Figura 9.8. Valores de redondez en función de la velocidad V_w , para cada profundidad a_e	138
Figura 9.9 Comparación entre las evoluciones de la redondez con la profundidad a_e para cada velocidad V_w	139
Figura 9.10. Comparación entre las evoluciones de la redondez con la velocidad V_w para cada profundidad a_e	140
Figura 9.11 Comparación entre las evoluciones de la cilindridad con la profundidad a_e para cada velocidad V_w	142
Figura 9.12 Comparación entre las evoluciones de la cilindridad con la velocidad V_w para cada profundidad a_e	142
Figura 9.13. Valores de rectitud en función de la profundidad a_e , para cada velocidad V_w	144
Figura 9.14. Valores de rectitud en función de la velocidad V_w , para cada profundidad a_e	145
Figura 9.15. Comparación entre las evoluciones de la rectitud con la profundidad a_e para cada velocidad V_w	147
Figura 9.16. Comparación entre las evoluciones de la rectitud con la velocidad V_w para cada profundidad a_e	147

ÍNDICE GENERAL

Figura 9.17. Valores de microdureza en función de la profundidad a_e , para cada velocidad V_w	148
Figura 9.18. Comparación entre las evoluciones de la microdureza con la profundidad a_e para cada velocidad V_w	149
Figura 9.19. Comparación entre las evoluciones de la microdureza con la velocidad V_w para cada profundidad a_e	150
Figura 10.1. Comparativa en imágenes SOM del acabado conseguido con a) rectificado ($a_e= 40 \mu m$ & $V_w=230$ r/min) y b) torneado (en seco). Zoom 3.0.....	152
Figura 10.2. Esquema en el que se compara el perfil de rugosidad originado mediante el torneado y el rectificado de la superficie.....	152
Figura A. 1. Partes de la rectificadora RCE750	174
Figura A. 2. Panel de control hidráulico	175
Figura A. 3. Panel de control eléctrico del cabezal	175
Figura A. 4. Diagrama del panel de control eléctrico	176
Figura A. 5. Diagrama del sistema de enfriamiento	177

ÍNDICE GENERAL

Índice de tablas

Tabla 3.1. Propiedades de las aleaciones de titanio α , $\alpha+\beta$ y β (adaptada de referencia) .	33
Tabla 3.2. Composición química de la aleación Ti-6Al-4V (UNS R56400)	37
Tabla 3.3. Propiedades físicas de la aleación Ti-6Al-4V (UNS R56400)	37
Tabla 3.4. Propiedades mecánicas de la aleación Ti-6Al-4V (UNS R56400) .	37
Tabla 4.1. Resumen comparativo de los diferentes mecanismos de desgaste y de la rugosidad (Ra) en función de parámetros relativos al torneado en seco de titanio (adaptada de)	52
Tabla 6.1. Comparación de energías específicas entre operaciones de corte convencionales y rectificado (adaptada de referencia)	64
Tabla 6.2. Intervalos de dureza Knoop para diversos materiales y abrasivos.	70
Tabla 6.3. Ejemplos de tamaños de grano de los discos	71
Tabla 6.4. Propiedades generales de los grupos de aglomerantes.	72
Tabla 6.5. Características generales de los procesos y máquinas para el rectificado	78
Tabla 6.6. Comparativa entre rectificados de alto rendimiento y convencional	83
Tabla 6.7. Recomendaciones generales para los fluidos en el rectificado	88
Tabla 6.8. Comparativa de mecanizados abrasivos	93
Tabla 6.9. Designación del tamaño de grano para distintos mecanizados abrasivos .	93
Tabla 6.10. Intervalos característicos de velocidades y avances para procesos abrasivos .	94
Tabla 8.1. Parámetros empleados en el mecanizado de Ti6Al4V mediante AWJM	105
Tabla 8.2. Parámetros de corte usados en las operaciones de torneado en seco de Ti6Al4V .	107
Tabla 8.3. Parámetro de corte seleccionados	113
Tabla 8.4. Relación entre los valores de Ra y λ_c para que el resultado obtenido esté dentro de norma	123
Tabla 9.1. Valores medios de Ra y su desviación típica	130
Tabla 9.2. Valores medios de redondez y su desviación típica	136
Tabla 9.3. Resultados de cilindridad obtenidos para cada ensayo	141
Tabla 9.4. Valores medios de la rectitud y su desviación típica	143
Tabla 9.5. Valores medios de microdureza y su desviación típica	148
Tabla M. 1. Recursos humanos empleados en la preparación de las probetas	310
Tabla M. 2. Tiempo de la preparación de las probetas	310
Tabla M. 3. Recursos humanos empleados en la realización de los ensayos	310
Tabla M. 4. Tiempo necesitado para la realización de los ensayos	310
Tabla M. 5. Recursos humanos empleados en la elaboración de los ensayos	311
Tabla M. 6. Tiempo empleado en la elaboración del documento	311
Tabla P. 1. Precio unitario correspondiente a cada categoría de recurso humano necesario .	316
Tabla P. 2. Precios unitarios utilizados en este proyecto	316
Tabla P. 3. Desglose presupuestario para la preparación de los ensayos	317
Tabla P. 4. Desglose presupuestario para la realización de los ensayos	317
Tabla P. 5. Desglose presupuestario para la elaboración del proyecto	317



Memoria

MEMORIA

Memoria

ÍNDICE DE LA MEMORIA

1.	Alcance y objetivo	5
2.	Contexto y justificación del trabajo	7
2.1.	El sector aeronáutico	7
2.1.1.	Actividad aeronáutica en el mundo	8
2.1.2.	Actividad aeronáutica en España	11
2.1.3.	Actividad aeronáutica en Andalucía	16
2.2.	Materiales empleados en la aeronáutica	19
2.2.1.	Materiales compuestos	21
2.2.2.	Superalaciones	21
2.2.3.	Aceros	22
2.2.4.	Aluminio	22
2.2.5.	Titanio	24
2.3.	Crecimiento del rectificado	25
2.4.	Grupo TEP-027 UCA	27
3.	Aleaciones de Titanio y aplicación en la aeronáutica	30
3.1.	Introducción	30
3.2.	Propiedades generales del titanio	31
3.3.	Tratamientos térmicos y aleaciones	35
3.3.1.	Aleación Ti-6Al-4V	36
3.4.	Aleaciones de titanio para aplicaciones aeronáuticas	38
3.4.1.	Aleaciones de titanio para aeronaves	38
3.4.2.	Estructura	39
3.4.3.	Turbina de gas	42
3.4.4.	Helicópteros	45
3.4.5.	Espacio	45
4.	Mecanizado por arranque de virutas	47

MEMORIA

4.1. Mecanizado de titanio por arranque de viruta	47
4.2. Torneado de titanio	48
4.2.1 Mecanismos de desgaste en torneado	50
4.2.2 Torneado en seco	51
5. Procesos de mecanizado abrasivo	53
5.1. Bruñido	54
5.2. Lapeado	55
5.3. Pulido	57
5.4. Abrillantado	57
6. Rectificado	58
6.1. Formación de viruta	60
6.2. Fuerzas de rectificado	62
6.3. Energía específica	63
6.4. Temperatura	64
6.4.1. Revenido	65
6.4.2. Quemado	65
6.4.3. Agrietamiento por calor	65
6.4.4. Tensiones residuales	66
6.5. Discos de rectificado	67
6.5.1. Abrasivos	70
6.5.2. Aglomerantes	71
6.5.3. Mecanismos de desgaste	73
6.5.4. Diamantado de discos	76
6.6. Tipos de rectificado	77
6.6.1. Rectificado plano	78
6.6.2. Rectificado cilíndrico	79
6.6.3. Rectificado sin centros	81
6.6.4. Rectificado de avance lento	81
6.6.5. Rectificado para eliminar grandes cantidades de material	82
6.7. Máquinas rectificadoras	83
6.7.1. Rectificadora planeadora	83
6.7.2. Rectificadora cilíndrica de exteriores	84
6.7.3. Rectificadora cilíndrica de interiores	85

MEMORIA

6.7.4. Rectificadora sin centros	85
6.7.5. Rectificadora de herramienta universal	86
6.8. Fluidos de rectificado	86
6.9. Consideraciones de diseño para el rectificado	88
6.10. Rectificado de Ti	89
6.10.1. Introducción	89
6.10.2. Propiedades de los discos para el rectificado de titanio	90
6.10.3. Condiciones de operación	91
6.11. Comparación del rectificado con otros procesos de corte	93
7. Evaluación de la integridad superficial	96
7.1. Microgeometría	96
7.2. Macrogeometría	99
7.2.1. Cilindricidad	99
7.2.2. Redondez	100
7.2.3. Rectitud	101
7.3. Microdureza	101
8. Metodología experimental	104
8.1. Protocolo de ensayos	104
8.1.1. Preparación de la probeta	104
8.1.2. Torneado	106
8.1.3. Rectificado	110
8.1.1.1 Preparación de la emulsión refrigerante	116
8.1.1.2 Revestimiento o diamantado	117
8.2. Identificación de ensayos	119
8.3. Metrología	120
8.3.1. Microgeometría	120
8.3.2. Macrogeometría	123
8.3.3. Microdureza	126
9. Resultados y discusión	130
9.1. Resultados de microgeometría	130
9.2. Resultados de macrogeometría	136
9.3. Resultados de microdureza	147
10. Conclusiones y líneas futuras	151

MEMORIA

10.1. Conclusiones	151
10.1.1. Microgeometría	151
10.1.2. Macrogeometría	153
10.1.3. Microdureza	154
10.2. Propuestas de mejora	156
10.3. Líneas futuras	157
11. Referencias bibliográficas	158

Capítulo 1

1. Alcance y objetivo

El rectificado es un proceso de eliminación de material y generación de nuevas superficies empleado, generalmente, en piezas metálicas para conseguir buenos resultados en el acabado y forma de la misma. En comparación a otras tecnologías como el torneado, con el rectificado se puede conseguir una precisión hasta 10 veces mayor. Esto es posible gracias a la herramienta, consistente en abrasivo compactado en un aglutinante, que mecaniza pequeñas partículas del material. En el mercado se diferencian varios modelos de herramienta en función de diversos criterios tales como su dureza, densidad del abrasivo, tamaño del grano, etc. Por otro lado, dependiendo del resultado o la operación requerida (rectificado plano, cilíndrico, de interiores, etc.), existen diferentes tipos de rectificado, habiendo prácticamente una determinada rectificadora para cada tipo de rectificado específico. No obstante la tendencia actual es crear rectificadoras de control numérico o multitarea.

Dado este tradicional uso del proceso de rectificado como operación de acabado, entre la amplia variedad de condiciones y tipos de rectificados, el presente trabajo tiene por objeto desarrollar una posible metodología para el estudio del rectificado cilíndrico en un metal señalado por su baja maquinabilidad, además de por sus excelentes propiedades mecánicas; el titanio.

La aleación objeto de estudio es una de las más empleadas en el sector aeronáutico, la UNS R56400 o también denominada Ti6Al4V. Esta aleación será mecanizada mediante la rectificadora cilíndrica RCE750, de la marca *Heller®*, ubicada en el taller mecánico de la Escuela de Ingeniería de Cádiz, bajo la gestión del departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial. Este equipo permitirá evaluar cómo influyen ciertos parámetros de fabricación (profundidad y velocidad de rotación de la pieza) en el acabado, forma y microdureza superficial de la pieza de Ti6Al4V. Así mismo serán comparados, en estos términos, las operaciones de rectificado ejecutadas respecto a la operación de mecanizado previa. Dicha operación previa consiste en el torneado en seco de la pieza de titanio, permitiendo así una mayor eficiencia medioambiental en el proceso experimental desarrollado.

MEMORIA

Para la interpretación y evaluación de los resultados correspondientes a cada aspecto de interés, se ha llevado a cabo un estado del arte en el que se engloba información relevante al material, los procesos de mecanizado ejecutados y evaluados, así como, de los métodos empleados en la evaluación de tales aspectos. Posterior a este estado del arte se realiza un recorrido por todo el procedimiento experimental desembocando en la discusión y exposición de conclusiones de los resultados obtenidos. Por último, se proponen una serie de líneas futuras con la posibilidad de ampliar el alcance de este proyecto.

Capítulo 2

2. Contexto y justificación del trabajo

Este capítulo tiene por objeto destacar el relevante papel que desarrolla actualmente el sector aeronáutico como principal motor industrial en muchas zonas del mundo, incluido España, donde este ha sustituido a otros sectores que, por tradición y estrategia geográfica, habían venido ocupando dichos lugares. Así pues además de repasar las características que lo definen así como las numerosas actividades que desarrolla, se refleja también en este capítulo, la relevancia de este sector en la economía.

Junto a la relevancia económica del sector, se destaca su gran interés en el mundo del I+D+i (Investigación + Desarrollo + innovación). Esto último se debe a los numerosos proyectos aportados a este ámbito, los cuales, dado el carácter relevante y la interrelación socio-económica del sector respecto a otras industrias, acaban por estimular, no solo el progreso económico, sino también el social.

Por lo tanto, nos encontramos ante una industria que realiza una gran inversión en numerosos proyectos con el principal fin de optimizar su proceso productivo, de aquí que se enmarque en tal sector, el contexto y justificación de este TFG.

2.1. El sector aeronáutico

La destacable dimensión global del sector aeronáutico es debida a una serie de características, que consiguen diferenciarlo claramente de otros sectores industriales. Algunas de estas singularidades que caracterizan de tal manera al sector, aparecen enumeradas a continuación [1]:

- Produce un fuerte impacto económico como generador de riqueza y conocimiento.
- Requiere de alta cualificación técnica además de desarrollar una gran difusión sobre otros sectores económicos, lo cual se manifiesta en las numerosas aplicaciones tecnológicas derivadas en ámbitos como la automoción o generación eléctrica.
- Necesita de elevadas inversiones.
- Presenta largos ciclos de desarrollo de sus productos, lo que impacta en el incremento del tiempo de retorno de las inversiones realizadas.

MEMORIA

- Posee una evidente dualidad civil y militar, estando esta última estrechamente influenciada por la política militar de los estados.
- Tienen como principal cliente y organismo regulador, así como gestor de la gran mayoría de las inversiones y recursos I+D+i, a los gobiernos estatales de forma que estos ejercen sobre la industria una gran influencia.
- El liderazgo del sector está en manos de grandes grupos industriales con fuerte carácter trasnacional y participación en la industria civil y de defensa, que necesitan y dependen de los servicios de una red de pequeñas y medianas empresas subcontratistas.

De esta forma estos factores, junto a otros muchos, acaban por condicionar un sector dominado por pocos grupos industriales, con actividad tanto en la industria civil como la de defensa y frecuente naturaleza transnacional, destacándose en este ámbito los fuertes vínculos con sus respectivos gobiernos.

2.1.1. Actividad aeronáutica en el mundo

Como ya se señalase en el apartado anterior, realmente son pocos los países dedicados a la fabricación de productos aeronáuticos, principalmente a consecuencia de los requerimientos tecnológicos y altos costes exigidos [2].

En beneficio para estos países, se ha visto como, tanto la producción y venta de aviones comerciales, han experimentado una evolución positiva en los últimos años, como se puede observar en el gráfico de la Figura 2.1, correspondiente al periodo comprendido entre 1981 y 2013. Así pues se puede, a partir del análisis de dicha gráfica, cuantificar en un 200% tal aumento experimentado en este periodo, aún a pesar de las crisis sufridas por el sector en la década de los 90 así como la más reciente correspondiente a los años 2008–2009.

La situación a día de hoy del sector, en cuanto al liderazgo del mismo se refiere, está protagonizada por la fuerte competencia entre las firmas *Boeing*® y *Airbus*® ambas líderes de los grupos industriales vinculados a Estados Unidos y Europa respectivamente. La firma norteamericana destaca por haber desarrollado, de forma tradicional, tal papel de liderazgo, destacando por encontrarse a la vanguardia tanto en aspectos de innovación como en el alcance de sus productos [2]. Sin embargo esta posición se ha visto amenazada en los últimos años por el grupo industrial europeo que, según datos de 2016, ha llegado a desbancar al estadounidense en cuanto a firma de pedidos se refiere, aun a pesar de que *Boeing*® siga manteniendo en este último año el liderazgo correspondiente a la entrega de pedidos realizadas [3].

MEMORIA

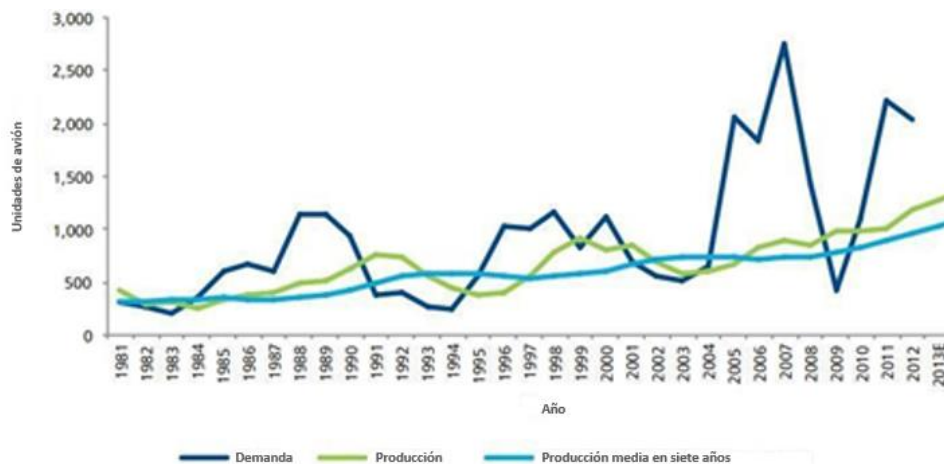


Figura 2.1. Demanda y producción de aeronaves comerciales desde 1980 hasta 2013. En el eje de abscisas se encuentra el tiempo en años y en el de ordenadas el número de aviones [1].

Estos dos grandes productores mundiales se ven así mismo acompañados en el sector por las respectivas industrias aeronáuticas vinculadas a países como Japón, Canadá, Brasil o Rusia. De estas industrias se destaca su cierta situación de liderazgo en otros productos del sector más específicos, aún a pesar de su diferenciada contribución menor [2].

En Canadá, se destaca el papel desempeñado por la empresa *Bombardier Aerospace*®, una de las referencias a escala global en el mercado de la aviación regional, así como también destaca por ser, nada menos, que el tercer productor mundial de aeronaves comerciales. En el señalado mercado de la aviación regional cabe destacarse también, aun a pesar del menor peso con respecto a su competidora canadiense, a la empresa *Embraer*®, líder de la actividad aeronáutica desarrollada en Brasil. Ambas firmas amenazan el status quo liderado por *Boeing*® y *Airbus*® al haber desarrollado modelos en el segmento de las 100–120 plazas. Esta situación ha alentado además a la industria aeronáutica vinculada a Japón, en la que se destaca la empresa *Mitsubishi Aircraft Corporation*® tradicionalmente dedicada al apoyo de *Boeing*® y *Airbus*®, a producir su primer jet regional en aras de aprovechar el nicho de mercado que aparentemente abandonan las firmas canadienses y brasileña [4].

A esta situación de palpable competencia, se le añade además el surgimiento de la actividad aeronáutica vinculada a países tales como Rusia y China, donde se está siguiendo una estrategia similar en misión de fomentar la actividad aeronáutica civil; el desarrollo de empresas referentes a dicha actividad bajo la supervisión y control estatal [5].

MEMORIA

En el caso concreto de Europa, se puede catalogar como sector estratégico a la actividad aeroespacial desarrollada y su correspondiente entramado de empresas, dado que favorece al viejo continente tanto en el ámbito industrial como social. Esto es debido a que juega un papel fundamental en el mantenimiento de las capacidades industriales y tecnológicas en materias como el transporte, comunicación y seguridad, además de su relevancia económica y fuente de empleo de alta cualificación [2].

La actividad aeroespacial en Europa y su entramado de empresas es catalogada como un sector estratégico para la industria y la sociedad de este continente. Juega un papel fundamental en el mantenimiento de las capacidades industriales y tecnológicas en materias como comunicación, transporte y seguridad, además de su relevancia económica y fuente de empleo de alta cualificación [2].

En base a datos estadísticos realizados por la *AeroSpace and Defence Industries Association of Europe* (ASD) para el año 2014 [6], el número de empleos generados por esta industria en Europa oscilaba la cifra de 573000, es decir, aproximadamente un 34% de los trabajadores de este sector en el mundo (ver Figura 2.2). Este volumen de empleos es algo similar al generado por la industria estadounidense, ya que cuenta con un porcentaje del 35%, lo que equivale a 606000 puestos de trabajo. En cuanto a ingresos, la situación es parecida favoreciendo de nuevo la diferencia existente a EEUU, pues se hace con un 46% del global frente al 40% de los europeos. Así pues queda constatada, a partir de estos datos, la supremacía desarrollada tradicionalmente por las industrias norteamericana y europea en el sector, frente a los países anteriormente mencionados.

La tasa de empleo generada en Europa se reparte entre cinco países: Francia, Reino Unido, Alemania, Italia y España. En estos países, las actividades que se desarrollen dependen, tanto de la tradición industrial que tenga dicha nación, así como de la empresa que lidere la actividad aeronáutica. En el caso concreto de la industria aeronáutica en España, esta se caracteriza por desarrollar la mayoría de las actividades dentro del campo de la fabricación y servicios aeronáuticos, siendo partícipe de este logro, el destacable salto cualitativo protagonizado por las empresas españolas.

MEMORIA

Panorama global de la industria aeroespacial en 2014

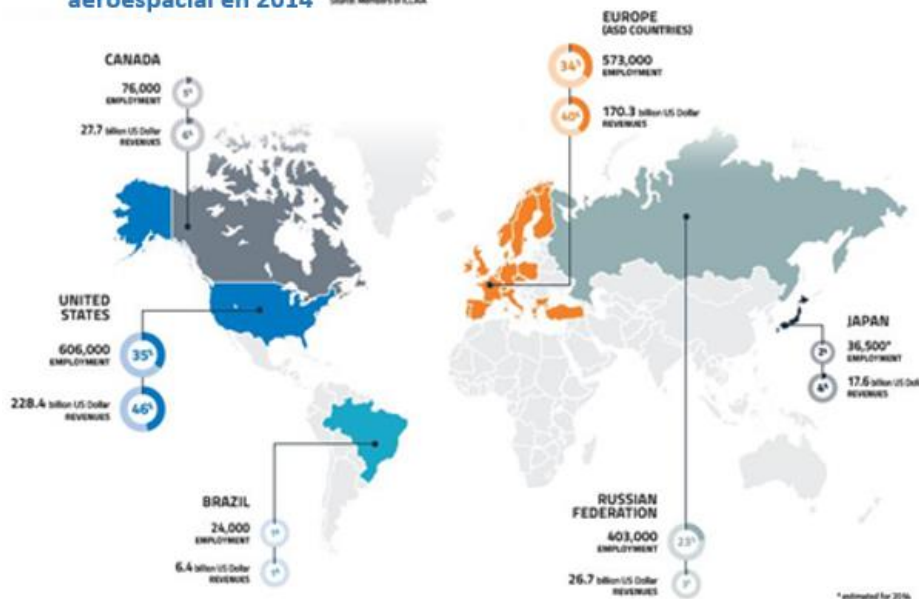


Figura 2.2. Vista general de la industria aeroespacial del año 2014, adaptada de referencia [6]

2.1.2. Actividad aeronáutica en España

Con objeto de contextualizar la actividad aeronáutica en España, explicada a lo largo de este apartado, se presenta a continuación una serie de acontecimientos claves en la evolución de dicha actividad [2]:

Los comienzos (1909–1914)

- El día 5 de Septiembre de 1909 en Paterna (Valencia) tiene lugar el primer vuelo de un aeroplano en España, el Brunet-Olivert, que fuera diseñado por Gaspar Brunet y pilotado por Juan Olivert, ver Figura 2.3.

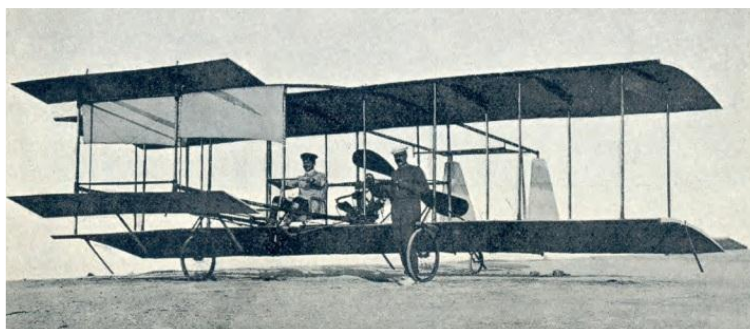


Figura 2.3. Primer vuelo en aeroplano en la historia de España

MEMORIA

- También en 1909 Antonio Fernández Santillana diseña y construye un biplano, que efectuará su primer vuelo en Niza.
- De nuevo en 1909, se pone en marcha en Carabanchel, la Escuela de Pilotos Militares.
- La Guerra de Marruecos y la I Guerra Mundial propician el desarrollo del motor Hispano Suiza.

Nacimiento de la industria aeronáutica española (1914–1930)

- En 1923 se realiza el primer vuelo exitoso del autogiro diseñado por Juan de la Cierva.
- También en 1923 se crea en Cádiz la empresa: *Construcciones Aeronáuticas, S.A* (CASA), que pasará posteriormente a formar parte del grupo *Airbus®*.
- En 1924 se crea otra empresa, Talleres Loring, en el aeródromo de Cuatro Vientos (Madrid). Es también en este mismo año y lugar donde se construye el Túnel Aerodinámico de Cuatro Vientos.
- En 1927 nace la compañía *Iberia* destinada al transporte de pasajeros.
- En 1928 nace la Escuela Superior de Aeronáutica.

Desarrollo de la industria aeronáutica (1931–1950)

- En 1939, tras la Guerra Civil, se destaca la creación del Ministerio del Aire como uno de los ambiciosos programas llevados a cabo entonces con el objetivo de dar un fuerte impulso a la industria aeronáutica.
- En 1942, y con objeto de promover el estudio y la investigación aeronáutica, nace el *Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial* (INTA).
- Es en la década de los 40 cuando se desarrollan los primeros productos propios; la saga de avionetas HM, los motores de Elizalde, el avión de entrenamiento HS-42 de HASA y el avión de transporte Alcotán C-201 de CASA.

La internacionalización de la industria aeronáutica (1950–1986)

- En 1950 se constituye en París la *Asociación de Material Aeronáutico* (AICMA), que hoy día se define como *AeroSpace and Defence, Industries Association of Europe* (ASD) [6].
- En 1954 nace en España la *Agrupación Técnica Española de Constructores de Material Aeronáutico* (ATECMA), que pasase a llamarse en 1965 como *Agrupación Técnica Española de Constructores de Material Aeroespacial* (ATECMA), cuya colaboración con su homóloga francesa AICMA (actualmente ASD) promovió la participación del sector aeronáutico español en futuros programas internacionales.

MEMORIA

- Durante las décadas de los 50 y 60 principalmente, la industria aeronáutica española desarrolla una serie de programas, de carácter tanto nacional como internacional, entre los que se destaca la construcción, en 1955, del primer reactor español, nombrado como HA-200 o "Saeta".
- En 1971 CASA adquiere una participación del 4,2% de la recién fundada, un año atrás, Airbus.
- En 1973 tiene lugar la fusión de las empresas Hispano Aviación y ENMASA en la también española CASA, generándose una sola empresa pública capaz de competir internacionalmente.
- Desde 1966, CASA comienza el desarrollo de actividades en el campo de materiales compuestos, lo que da lugar a su participación de forma destacada en diferentes programas transnacionales, tales como la fabricación del estabilizador horizontal del A320 lanzado en 1984, estructura pionera en el sector aeronáutico civil al ser de las primeras en estar hechas de dicho material.

La integración de la industria aeroespacial europea (1986-1999)

- En 1993 se crea el *European Aerospace Industry Council*, órgano interlocutor entre la Industria Aeroespacial Europea y la Comunidad Europea.
- Entre los años 1993 y 1998 se crea el Plan Tecnológico Aeronáutico I en España, reforzando de esta forma la internacionalización y el progreso de la industria aeronáutica española.
- En 1999 se fusionan *Daimler Chrysler* y *Aerospatiale Matra* para formar EADS (*European Aeronautic Defence and Space Company*), al que escasos meses después se sumó CASA con un 5,53% de participación.
- En el año 2000 se creó *Airbus S.A.S.*, con una participación de EADS del 80 % y de BAe Systems del 20 %.

El presente de la industria aeronáutica española (2000-actualidad)

- En la última década se destaca uno de los programas más importantes en el ámbito militar, el desarrollo del avión de combate *Eurofighter 2000*, en el que ha participado España junto a Alemania, Inglaterra e Italia.
- En el año 2003 se lanzó el programa del avión de transporte militar pesado A400M, en el que participan 7 naciones, incluidas España donde se hace el montaje final en las instalaciones de Sevilla, lo cual es ya, por sí mismo, un hito pues es la primera vez en la historia que una línea de montaje final de un proyecto aeronáutico internacional tiene sede en España.
- Otro potencial desarrollo de esta Industria Aeronáutica Española es el lanzamiento del programa *Tiger* de *Eurocopter*.

MEMORIA

- En cuanto a la aviación civil, España ha aumentado su participación en programas de Airbus (del orden del 10%), llegando a asumir plenamente el diseño, desarrollo, certificación y fabricación de determinados componentes relativos a proyectos como el A380.
- Otros campos como la fabricación de turbinas, de sistemas de gestión de tráfico aéreo, los simuladores de vuelo o el mantenimiento, forma parte activa del salto cualitativo de la actividad de este sector en España.

Como fruto de lo acontecido, España cuenta a día de hoy con productos, capacidades y proyectos líderes a nivel mundial, posicionándose en el quinto lugar en el ámbito de la Unión Europea, por detrás de Francia, Reino Unido, Alemania e Italia.

En cuanto a la repartición geográfica dentro del país, se destaca como concentrada la industria aeronáutica, dado que, para el año 2014, el 93% de la facturación se llevó a cabo en cuatro comunidades autónomas: Madrid (49,4%), Andalucía (21,7%), Castilla La Mancha (12%) y País Vasco (9,9%). Otras Comunidades con actividad aeroespacial son Cataluña (2,2%) y Castilla y León (1,3%), ver Figura 2.4.

La clasificación convencional de la industria asociada al sector diferencia entre la industria cabecera (con o sin capacidad de integración), industria sistemista-subsystemista e industria auxiliar (ver Figura 2.5). Así mismo se pueden añadir además a esta clasificación a la industria de mantenimiento así como a las infraestructuras públicas dedicadas a la investigación y desarrollo.



Figura 2.4. Peso de la facturación en el sector aeroespacial de las principales Comunidades Autónomas [7].

MEMORIA

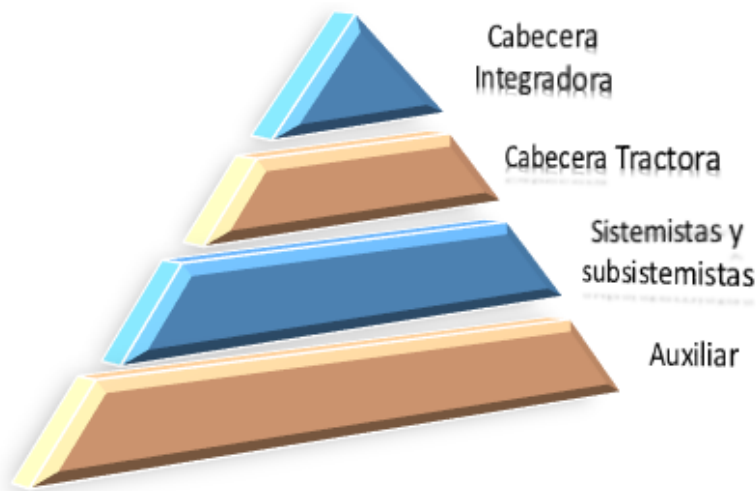


Figura 2.5. Estructura del sector aeronáutico

Las principales características de cada una de ellas son expuestas a continuación [1]:

Industria cabecera integradora

La principal actividad de estas empresas es la realización del ensamblaje y la correspondiente venta de aeronaves al cliente final. Esta actividad implica la realización de pedidos o subcontratación a las empresas que aparecen por debajo de ella según la clasificación mostrada en la Figura 2.5. Por lo tanto, al generar negocios con tales empresas, ostentan un papel de gran importancia en el sector pues son los principales agentes de la activación del mismo.

Industria de cabecera tractora

A esta industria corresponden todas aquellas empresas que participan también en la línea de ensamblaje final pero carecen sin embargo de la capacidad de integración del producto final, concentrándose todos sus esfuerzos en la integración de grandes sistemas (*Final Assembly Line*, FAL). En consecuencia se genera un efecto arrastre para las industrias que se encuentran en posiciones inferiores de la cadena de suministros, de manera similar al efecto ya destacado para las empresas de la industria cabecera integradora.

Industria sistemista y subsistemista

Corresponden a esta industria aquellas empresas cuyo volumen de trabajo está fuertemente influenciado por el efecto arrastre vinculado a la industria tractora. Así pues tales empresas ocupan una posición intermedia entre dicha industria tractora y la auxiliar, diferenciándose además por aspectos tales como su tamaño, la diversidad de

MEMORIA

clientes con las que cuentan, así como, su capacidad integradora, destinada al ensamblaje completo de sistemas o subsistemas de carácter mecánico o electrónico.

Industria auxiliar

Un gran conjunto de PYMES componen esta industria, las cuales trabajan por encargo de la industria tractora o sistemista. Las funciones diversas que ofrecen estas empresas abarcan desde actividades asociadas al mecanizado de piezas por encargo, hasta el cálculo o estudio asociado a distintos componentes.

Su posición en la clasificación mostrada en la Figura 2.5 no supone infravalorar la actividad de esta industria, pues, a consecuencia de ser la base del suministro, sus costes tienen un gran impacto sobre el producto final. Por lo tanto, se puede considerar como factor clave, en orden de mejorar la competitividad de la industria manufacturera aeronáutica, contar con una buena industria auxiliar.

Industria de mantenimiento

Su actividad conlleva todas aquellas operaciones de inspección, control y sustitución (Maintenance, Repair and Overhaul, MRO) de componentes con objeto de garantizar la seguridad en las operaciones a llevar a cabo por las aeronaves. Estas tareas conllevan un gran valor estratégico pues suponen una relevancia económica importante, ya que su coste puede elevarse hasta dos veces el precio de adquisición del avión. A pesar de depender en gran medida del volumen de aeronaves que estén operativas, la demanda del sector es recurrente, por lo que su volumen de negocio es más estable que el de la industria de fabricación.

2.1.3. Actividad aeronáutica en Andalucía

Andalucía desarrolla un papel relevante en el panorama aeronáutico español, al consolidarse, como la segunda comunidad autónoma por volumen de facturación y empleo (ver Figura 2.4).

La actividad aeronáutica en Andalucía se remonta al año 1923, año en el que se creara en Cádiz Construcciones Aeronáuticas S.A. (CASA). Desde entonces el sector aeroespacial andaluz ha ido creciendo hasta la actualidad. Este crecimiento se demuestra en la existencia de aproximadamente 120 empresas, 89% de las cuales se localizan en el eje Sevilla-Cádiz, que, según datos del año 2015, facturan más de 2300 millones de euros así como dan trabajo a unas 13700 personas [8]. Tal concentración de empresas en el eje de Sevilla-Cádiz se debe a la presencia de la planta tractora de Airbus en Sevilla

MEMORIA

así como a la mayor tradición industrial del sector metal-mecánico correspondiente a estas provincias frente al resto de la comunidad.

El conjunto de empresas del sector aeroespacial andaluz así como otros agentes del mismo, como es el caso de universidades, organismos de la administración regional o sindicatos, son representados por el clúster aeroespacial andaluz denominado Fundación Hélice.

Referente a la actividad industrial desarrollada, destacan como principales actividades la mecánica y la del utillaje (mecanizados, chapistería, transformaciones mecánicas, etc.), con un 27% de ocupación, seguida por aquellas dedicadas a labores de ingeniería y consultoría (19% de ocupación) y servicios (18% de ocupación). No obstante se destaca la cada vez mayor diversidad de empresas con diferentes actividades principales en el sector aeroespacial andaluz (ver Figura 2.6) [8].

Según la clasificación representada en la Figura 2.5 en Andalucía se encuentra Airbus como empresa cabecera. Esta cuenta con varias plantas en el territorio andaluz destacando entre las mismas las factorías de San Pablo y la FAL del A400M, la cual es la primera planta en España en albergar una línea de montaje final de un proyecto aeronáutico internacional (Figura 2.7).

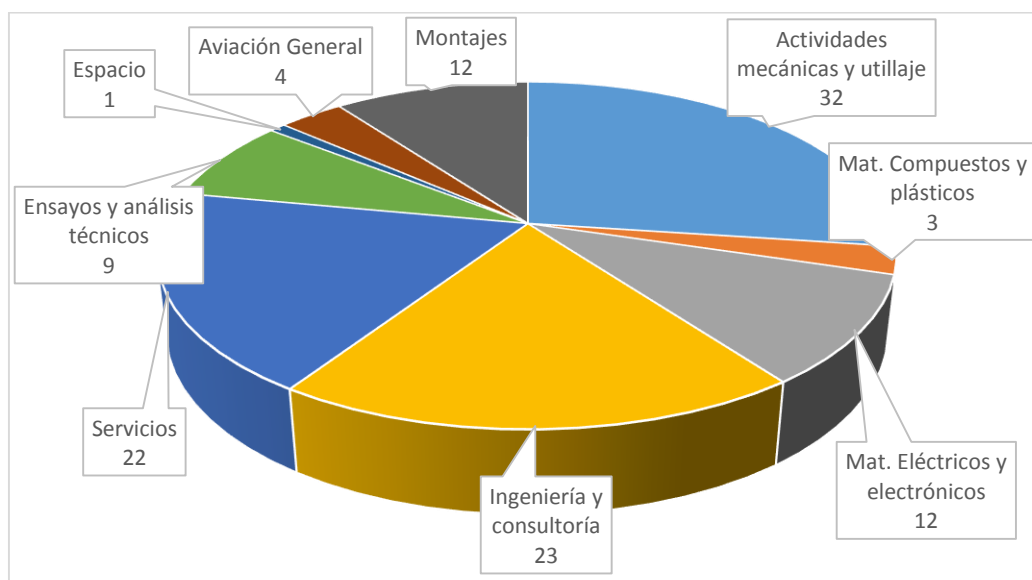


Figura 2.6. Distribución de empresas del sector aeroespacial andaluz según su actividad principal, adaptada de referencia [8].

MEMORIA



Figura 2.7. Ensamblaje final del A400M [9].

Además del A400M el sector aeronáutico andaluz cuenta con otro gran programa aeronáutico que está teniendo una especial incidencia sobre el mismo. Dicho programa es el A350 XWB, el nuevo avión con el que Airbus busca competir en el mercado internacional bajo nuevos criterios, más eficientes y sostenibles. Así pues, la planta de Airbus en Puerto Real (Cádiz) fabrica el estabilizador horizontal y *Alestis Aerospace*® se encarga del desarrollo y producción de la belly fairing (Figura 2.8) y el cono de cola [1]. Además, se han creado los centros ATLAS y CATEC dedicados a la experimentación de aeronaves no tripuladas y a la investigación en materiales, automatización y procesos respectivamente.



Figura 2.8. Estabilizador horizontal o HTP (izquierda) [10] y Belly fairing (derecha) del A350 XWB [11].

A pesar de estos datos, la gran parte de empresas andaluzas se encuentra en la industria auxiliar, desarrollando actividades como:

- Montaje de equipos y sistemas.
- Montaje de medianos y pequeños conjuntos.
- Mecanizados.

MEMORIA

- Chapistería y otras transformaciones mecánicas.
- Fabricación de materiales compuestos y plásticos.
- Utilillaje.
- Fabricación de material eléctrico y electrónico.
- Procesos finales.
- Cálculo de sistemas

Asimismo, aunque los programas del A400M y A350 XWB se consideran los principales motores del clúster andaluz para los próximos años, Andalucía ejerce una destacada presencia en los grandes proyectos del sector, dada su tradicional implicación en el resto de programas de Airbus Group (Airbus, Airbus Military). Así pues, en los programas militares hay que subrayar su colaboración en los aviones de ligero y mediano tamaño (C295 y CN-235), que siguen gozando de una gran aceptación en el mercado mundial [1].

2.2. Materiales empleados en la aeronáutica

Con objeto de mantener un progreso continuado de las prestaciones, siempre al menor coste posible, los diseñadores están constantemente investigando en materiales más resistentes, duraderos y ligeros. Amenorar el peso de las aeronaves es relativamente fácil mediante la reducción de la densidad de los materiales empleados en su construcción. En cambio, se encuentra mayor dificultad, en el desarrollo de nuevos materiales avanzados capaces de proporcionar mayores prestaciones a parte de la ligereza de los mismos. Así pues tales materiales, como las superaleaciones y los materiales compuestos, están destinados a determinar el futuro del sector.

La reducción de peso de una aeronave, por paupérrimo que sea, influye determinadamente en la optimización de la rentabilidad de la aeronave. Para entender esto se puede observar como en la Figura 2.9, donde se representa la distribución aproximada del peso de un avión comercial, solo el 4% del peso de la misma se destina al transporte de pasajeros, que es lo que realmente genera beneficios en este tipo de aeronaves.

En cuanto al uso o distribución de los materiales en el diseño de la aeronave, este vendrá determinado por las diferentes solicitudes a las que se someten las diversas partes de la aeronave. Así pues se destaca una gama de materiales, lo suficientemente amplia, capaces de cumplir con tales exigencias. Esta heterogeneidad en el empleo de materiales se mantiene incluso en nuevos diseños de avión comercial, como el A350 XWB de *Airbus*®

MEMORIA

y el B787 o Dreamliner de *Boeing*®, en los que se destaca una mayor empleabilidad de materiales compuestos respecto a modelos anteriores de ambas empresas (ver Figura 2.10).

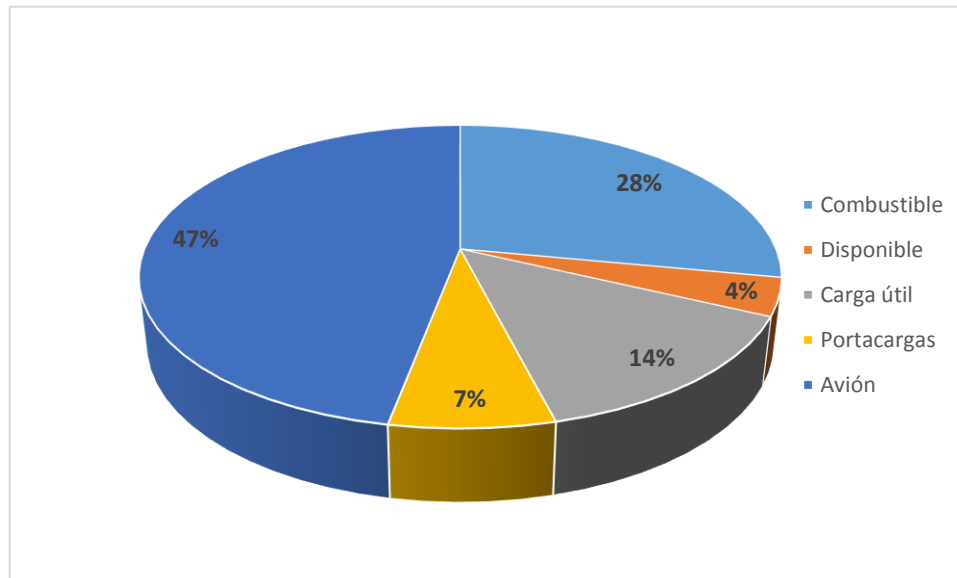


Figura 2.9. Distribución de pesos de un avión comercial (adaptada de referencia [12]).

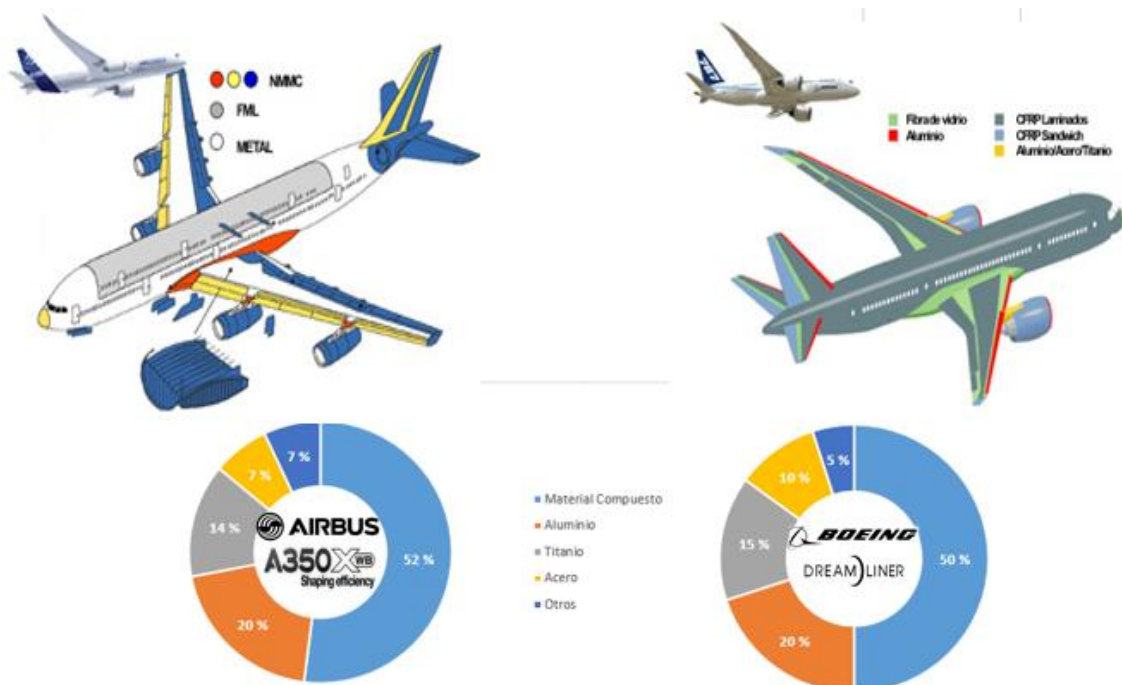


Figura 2.10. Composición de la aeronave A350 XWB de Airbus® (izquierda) y de la aeronave B787 de Boeing® (derecha). Adaptada de referencia [13]

MEMORIA

Los principales materiales empleados en la industria aeronáutica pasan a ser mencionados a continuación.

2.2.1. Materiales compuestos

Un material compuesto es una combinación de dos o más materiales que difieren en forma y composición química, siendo además insolubles entre sí. Tal combinación se materializa en la unión de dos componentes con funciones muy específicas; la matriz que proporciona cohesión, estabilidad y protección al segundo componente, el refuerzo, cuya misión es la de resistir los esfuerzos. De esta forma se obtiene un material con propiedades y rendimiento estructural superior a la simple suma de las propiedades de estos componentes [1].

El uso de estos tipos de materiales ha incrementado considerablemente no solo en el sector aeroespacial donde se destaca actualmente un pujante uso de este material ya sea en el diseño de satélites o de aviones (ver Figura 2.10), sino también en una amplia variedad de aplicaciones; electrónica, elementos arquitectónicos y estructurales en construcción, artículos deportivos, construcción naval, etc.

Considerando como criterio de clasificación la naturaleza de la matriz, los materiales compuestos pueden clasificarse en cuatro grupos principales:

- Compuestos de matriz metálica (MMC)
- Compuestos de matriz no metálica (NMMC)
- Compuestos de matriz polimérica
- Compuestos de matriz cerámica

2.2.2. Superalaciones

Este material, consistente en una base de níquel, hierro o cobalto en los casos más comunes, es uno de los materiales más empleados del sector aeroespacial, estando fuertemente ligado su desarrollo a esta industria. Destacan principalmente por su capacidad para soportar sollicitaciones mecánicas en ambientes adversos gracias a su resistencia a altas temperaturas, a la corrosión, así como al agrietamiento por corrosión bajo tensiones. Algunas de estas aleaciones ofrecen además una buena soldabilidad y ductilidad, como es el caso de las superaleaciones denominadas como HASTELLOY X y HAYNES 188. Estas son empleadas en aplicaciones asociadas a los motores de combustión tales como post-quemadores, las turbinas de gas, en componentes como conductos de transición, cámaras de combustión, revestimientos de llama o, tubos de escape y calentadores para cabinas. Además, superaleaciones como NIMONIC o

MEMORIA

HASTELLOY B, también son empleadas en el sector; álabes de turbina, discos, piezas forjadas, secciones de anillos y herramientas para trabajos en caliente (NIMONIC) y componentes de los turbos de los motores a reacción (HASTELLOY B) [14].

2.2.3. Aceros

Dentro de los aceros, entre aquellos con bajo porcentaje de carbono, es el SAE 1025 el comúnmente empleado en aeronáutica. Este material presenta excelentes propiedades de maquinabilidad y soldabilidad además de destacarse su respuesta favorable al tratamiento térmico y trabajo en frío. Su uso aeronáutico está destinado a elementos tales como soportes, tren de aterrizaje o la bancada del motor [14].

Además, y sobre todo para la construcción de elementos mecánicos, se emplea el SAE 1042, acero con un mayor porcentaje de carbono respecto al anterior—en torno a 0,40% de C, lo que se puede considerar una concentración media de tal elemento en el acero, suficiente para presentar mayor resistencia, a pesar, de su menor maquinabilidad [14].

Otro acero de concentración media de carbono empleado en el sector es el SAE 4130, el cual se particulariza al presentar una mayor concentración de algunos aleantes, en este caso de Cromo y Molibdeno. Esto le permite una mayor resistencia entre otras propiedades tales como su soldabilidad y maquinabilidad. Respecto a sus aplicaciones, estas van dirigidas a estructuras tales como los motores de aviación y tuberías soldadas [14].

Otro acero que destaca por su alto contenido de Cromo y su concentración media en carbono es el acero inoxidable, empleado también en el sector, principalmente, en engranajes, válvulas, álabes de turbinas y ejes, a consecuencia de su alta resistencia. Entre otras de sus propiedades se encuentran su resistencia a la oxidación y corrosión así como sus excelentes características de mecanizado [14].

2.2.4. Aluminio

Las razones fundamentales del empleo de este material en el sector son su alta relación resistencia–ligereza así como su resistencia frente a la corrosión. Otras características a destacar son su fácil conformado y maquinabilidad, su alta conductividad eléctrica y térmica, así como su no toxicidad ni magnetismo [15].

Tal y como se muestra en la Figura 2.11, donde se recoge el porcentaje en peso de cada material usado en los diferentes modelos de avión comercial de *Boeing*®, B767, B777 y B787, el empleo de aluminio en las aeronaves ha ido disminuyendo. Sin embargo, el

MEMORIA

aluminio sigue siendo un material de destacada importancia en el diseño de aeronaves siendo probable que aleaciones de aluminio más ligeras, como la de aluminio litio (Al-Li) sean especialmente relevantes en la fabricación de aeronaves modernas como el A350 XWB.

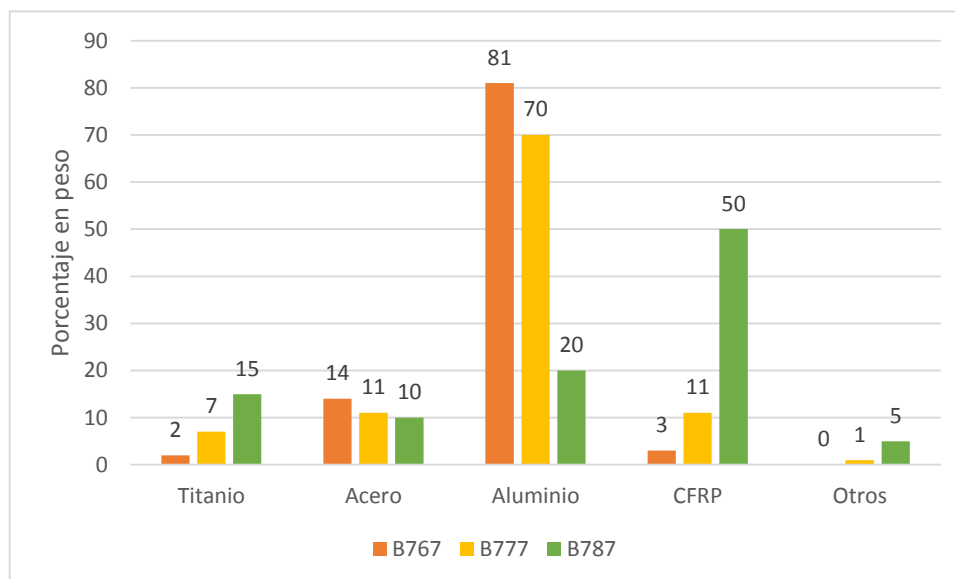


Figura 2.11. Aproximación del porcentaje en peso de los principales materiales usados en el Boeing 767, 777 y 787 (adaptada de referencia [1]).

Entre las aplicaciones más comunes de este material en la aeronave se puede destacar, entre otras muchas, su empleo en [15]:

- Alas de los aviones (A7150-T6)
- Partes del fuselaje
- Elementos de fijación y revestimientos del fuselaje (A2024-T3)
- Vigas
- Estructuras tubulares
- Uniones de estructuras
- Ejes
- Engranajes
- Pistones de freno e hidráulicos (A6061-T6)
- Pasadores de bisagras
- Tornillos sin fin (A7075-T6)

MEMORIA

2.2.5. Titanio

Su notable comportamiento frente a condiciones hostiles como la corrosión, temperaturas extremas (no solo altas sino también criogénicas), así como, su alta resistencia mecánica, convierten al titanio en un material atractivo para la industria aeroespacial. Sin embargo su empleo es más limitado que en el caso de otros materiales debido a su difícil maquinabilidad y consecuente coste. De esta forma, la inclusión de este material en el diseño de una aeronave se justifica en base a su rendimiento y al previsible ahorro en costes de mantenimiento.

A pesar de estas limitaciones presentadas por el material, el cada vez mayor conocimiento que se tiene acerca de los métodos de conformado para el titanio ha permitido un incremento de su empleo en aeroestructuras relativamente actuales. El uso cada vez mayor del titanio queda reflejado en el gráfico de la Figura 2.12, destacando el modelo A380 de *Airbus*® por ser el que presenta mayor cantidad de titanio. En dicho modelo de avión, el empleo de este material fue amplio, tal y como se muestra en la Figura 2.13.

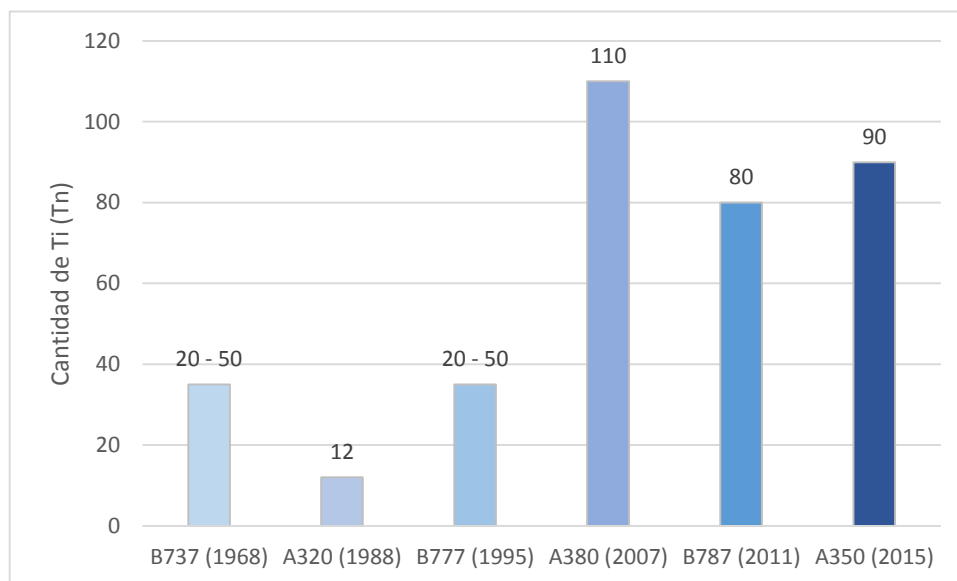


Figura 2.12. Cantidad en toneladas de titanio utilizado en diferentes modelos de avión [16].

MEMORIA



Figura 2.13. Partes del A380 fabricadas en titanio.

2.3. Crecimiento del rectificado

El interés en la investigación del rectificado ha ido en aumento en los últimos años. Muestra de ello es la gráfica representada en la Figura 2.14, en la que se refleja cómo, en las últimas dos décadas (1990–2010), las publicaciones relacionadas con este proceso se han visto prácticamente duplicadas.

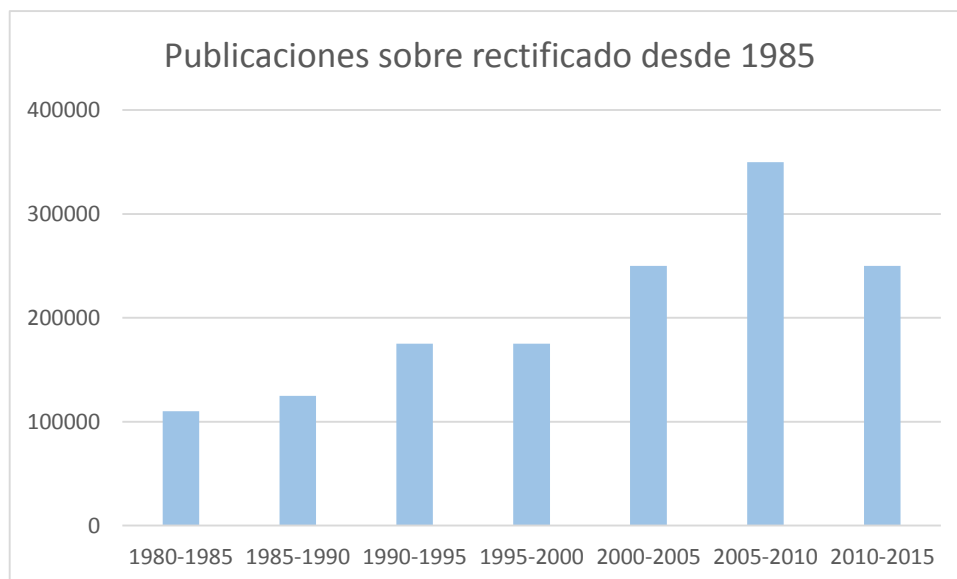


Figura 2.14. Número aproximado de publicaciones sobre el rectificado desde 1985 [17].

Respecto a los materiales estudiados en estas publicaciones se destaca una clara supremacía de los metales como los materiales que más se rectifican siendo los más comunes el acero y el hierro dado su mayor uso dentro de la industria en general durante estos últimos años (ver Figura 2.15).

MEMORIA

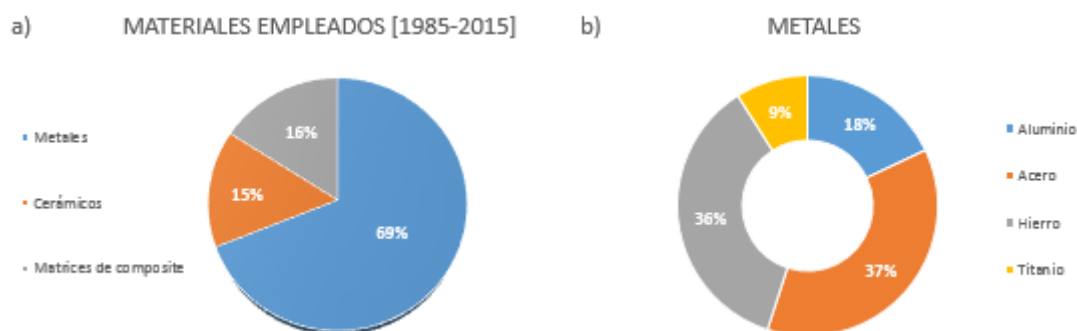


Figura 2.15. a) Materiales más empleados en el rectificado y b) Metales más comunes [17].

En cuanto al titanio, su menor presencia en estos estudios, según lo observado en la gráfica b) de la Figura 2.15, da lugar a pensar que el titanio no tiene apenas relevancia en la industria y concretamente, en el rectificado. Sin embargo es importante recalcar la importancia que está adquiriendo este material en los últimos tiempos. Ejemplo de ello es el crecimiento de la demanda global de este material, en gran parte motivada por el desarrollo de la industria aeroespacial (ver Figura 2.16). Consecuentemente, la producción de titanio en el mundo se ha disparado hasta el punto de provocar un considerable aumento en el precio; el titanio ha pasado de 6\$/kilo en 2003 a 15\$/kilo en 2007 [18]. La causa de esta creciente inversión en la industria, en gran medida la aeroespacial, por titanio, incluso a pesar de su precio y de su baja maquinabilidad, se encuentra en su alta relación resistencia-peso y su resistencia a la corrosión. Ejemplos de su empleo en esta industria se encuentran en elementos de unión, tren de aterrizaje, componentes del motor así como en la fabricación de superficies exteriores de cohetes y aviones supersónicos, debido a su ligereza y capacidad del material para soportar la fricción generada por el aire (ver Figura 2.10 y Figura 2.13).

Este interés creciente por el titanio en la industria aeroespacial ha motivado, como en otros muchos procesos, el alto crecimiento experimentado por el titanio rectificado dentro de la aeronáutica, como se muestra en la Figura 2.17. Tal evolución demuestra la utilidad del proceso dentro del sector aeronáutico, destacando como uno de los procedimientos de acabado superficial más empleados del momento.

MEMORIA

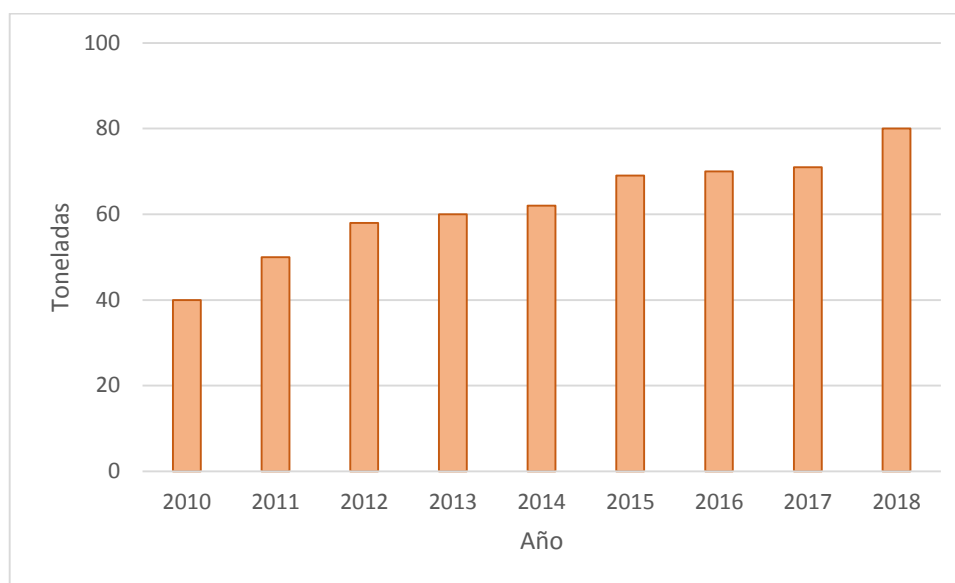


Figura 2.16. Pronóstico de la demanda mundial de titanio para aeronaves (adaptada de referencia [16]).

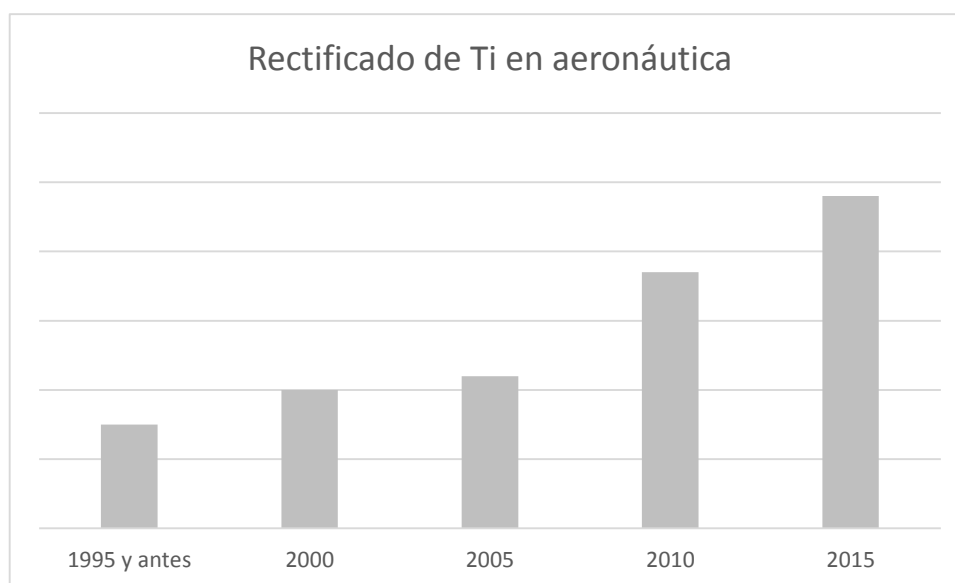


Figura 2.17. Evolución del titanio rectificado dentro del sector aeronáutico [13].

2.4. Grupo TEP-027 UCA

El grupo TEP-027 es un grupo de investigación de Ingeniería y Tecnologías de Materiales y Fabricación con sede en la Universidad de Cádiz. Actualmente las líneas de investigación de este grupo se centran en las temáticas listadas a continuación [19 y 20]:

MEMORIA

- Procesos de fabricación aeronáuticos
- Mecanizado de materiales de uso estratégico en la industria aeroespacial
- Procesos de conformado de materiales
- Análisis y evaluación del rendimiento de procesos de mecanizado
- Ingeniería de la calidad industrial
- Metrología industrial
- Sistemas de fabricación inteligentes

En cuanto a los materiales objetos de estudio, el grupo se especializa en el mecanizado de una destacable diversidad de los mismos, muchos de los cuales con empleo recurrente en la industria aeroespacial, como es el caso de los materiales compuestos (de matriz metálica o no metálica) o metálicos como el aluminio y el titanio. Respecto a este último, se destaca particularmente la investigación desarrollada en el proceso de torneado en seco del mismo. Investigaciones como estas gozan de un considerable alcance, lo que ha permitido a este grupo adquirir una mayor experiencia dentro del sector aeronáutico, convirtiéndose pues en un recursivo para las empresas dentro del sector.

Razón de la apreciación e interés del sector aeroespacial en este tipo de investigaciones, se encuentra en la resolución de un problema insistente en esta industria; obtener las mejores propiedades con el menor peso posible. Esto ha implicado el estudio constante en el ámbito de los materiales, llegando a encontrarse actualmente el sector en el pujante empleo y desarrollo de los ya comentados materiales compuestos, con matriz metálica y no metálica, y los metales, donde se emplean básicamente el aluminio y el titanio. En referencia a los metales, el aluminio se emplea principalmente en elementos estructurales como pueden ser las alas, fuselaje, costilla, larguerillos, cuadernas, etc. En cambio, el titanio es empleado en piezas críticas, como es el caso de los elementos de unión, en las que se requieren propiedades mecánicas mucho más exigentes que el aluminio no puede cubrir. Además, las exigencias de calidad sobre estas piezas son altísimas por lo que es fundamental la optimización del proceso de mecanizado en aras de satisfacer tales exigencias.

El principal proceso de mecanizado aplicado a la obtención de bulones y elementos de unión, es el torneado, bien sea en húmedo o en seco. Sin embargo en la mayoría de las situaciones, este proceso llega a ser insuficiente para cubrir las exigencias de calidad en tales piezas. Es por ello que se recurra habitualmente al rectificado, un proceso posterior que permita mejorar la calidad superficial y geométrica de las piezas de titanio. No obstante, sino se consigue aplicar una metodología óptima en este proceso, las

MEMORIA

propiedades del material pueden verse empeoradas, comprometiendo el desempeño de las piezas.

Por ello, el grupo TEP-027 desarrolla una línea de trabajo en el proceso de rectificado, en la cual, se enmarca el siguiente proyecto. La propuesta de este es evaluar cómo afectan diferentes parámetros del proceso de rectificado cilíndrico, concretamente la profundidad de corte y la velocidad de rotación de la pieza, en aspectos tales como la micro y macrogeometría, así como, la microdureza de las piezas obtenidas. En orden de facilitar la comprensión y obtención de conclusiones a partir de los resultados obtenidos se realiza un estudio del proceso de rectificado en sí y de las posibilidades que ofrece mediante un estado del arte en el que se incluyen los procesos de mecanizado abrasivo, las variables que intervienen, las herramientas, los tipos de rectificado y sus maquinarias, los fluidos de corte, etc. Dicho estado del arte se desarrolla a partir de los capítulos siguientes.

Capítulo 3

3. Aleaciones de Titanio y aplicación en la aeronáutica

3.1. Introducción

El titanio comienza a ser verdaderamente interesante para la industria aeronáutica a partir de los años 50, pues es entonces cuando comienza a emplear, en sustitución de las aleaciones ligeras de la época, en aeroestructuras y componentes del motor cuyos requerimientos de temperatura se volvieron demasiado exigentes para tales aleaciones. Actualmente es uno de los materiales en auge, convirtiéndose en prácticamente elemental, en el sector aeronáutico. Las principales características que lo avalan son la alta calidad de sus propiedades mecánicas, físicas y químicas –ligereza, dureza y resistencia a la corrosión–, la amplia gama de aleaciones capaces de formar y su comprobada empleabilidad en fabricación de piezas y productos y procesos térmicos, hechos que lo han posicionado rápidamente en lo más alto del mercado.

Ejemplo del peso que posee el titanio y sus aleaciones actualmente en la industria aeroespacial es su gran número de aplicaciones, que van desde soportes resistentes a la corrosión a componentes críticos en misiles y aviones. Aproximadamente son 10 las aleaciones con mayor uso en la creación de estructuras de titanio; alrededor de un 90% de estas aplicaciones usan tres grados de titanio sin alear y las aleaciones Ti–8Al–1Mo–1V, Ti–6Al–6V–2Sn, Ti–13V–11Cr–3Al, Ti–5Al–2.5Sn y Ti–6Al–4V siendo estas dos últimas las más usadas con diferencia. Además, dado el crecimiento y maduración de la industria del titanio, probablemente nuevas aleaciones ya se estén o vayan a emplearse para nuevas aplicaciones.

Aunque existen múltiples criterios de selección de una aleación para una aplicación en particular, factores como los niveles de resistencia, ductilidad, tenacidad, condiciones de servicio, maquinabilidad y la disponibilidad de mercado son comúnmente considerados. En el ANEXO I se recogen las propiedades más características de ciertas aleaciones de titanio y pudiendo servir como un comienzo para la selección del material óptimo.

MEMORIA

3.2. Propiedades generales del titanio

El titanio es el noveno elemento y séptimo metal más abundante de la corteza terrestre además de ser un constituyente de varios minerales comunes. Entre todos estos minerales, destacan, a consecuencia de su importancia económica, el rutilo y la ilmenita, siendo este último el más abundante de ambos, a pesar de ser del que menos metal se obtiene.

A consecuencia de su ligereza, dureza y resistencia tanto a la tracción como inclusive a altas temperaturas, el titanio se ha convertido en un material recurrente para situaciones en las que el factor peso es determinante o para aquellos casos en los que el ambiente es demasiado corrosivo. Así mismo, una de las propiedades principales del titanio, que lo condicionan como apropiado frente a ambientes corrosivos, es su fuerte afinidad con el oxígeno, lo que le permite crear una capa fina de óxido invisible y estable, llegando a considerar este metal como esencial en los procesos metalúrgicos.

Por otro lado, también posee llamativas propiedades que convierten al titanio en un material atractivo en otros muchos sectores. Ejemplo de ello es su biocompatibilidad, gracias a la insolubilidad en tejidos humanos de la fina capa de óxido que es capaz de generar. A consecuencia de esta tolerancia mostrada por el organismo en tales condiciones, el titanio desarrolla actualmente un relevante papel en el campo de la medicina, donde es usado para prótesis, tornillos óseos, implantes dentales, herramientas quirúrgicas, etc.

Otras propiedades en las que destaca el titanio son sus propiedades mecánicas, siendo estas muy similares a las del que se considera su principal competidor; el acero inoxidable, tanto puro como aleado. De igual forma el titanio es valorado por su tenacidad a la fractura, su maleabilidad – que permite su conformado en forma de chapas delgadas– así como su ductilidad, que permite su obtención en forma de alambres e hilos. Respecto a su elasticidad, el titanio ofrece un módulo elástico menor que el acero, por lo que sufre una deformación mayor que la experimentada por otros metales. Además, la elasticidad del titanio depende del tipo de estructura que lo conforma, pudiendo presentar a través de ella también dimorfismo. Así pues si el titanio es sometido a temperaturas superiores a la de transición beta (β), de un valor igual a 822 ± 2 °C presenta una estructura microscópica Cristalina Cúbica Centrada en el Cuerpo (BCC) o beta, mientras que a temperaturas inferiores tiene una microestructura Hexagonal Compacta (HCP) o alfa (α). Esta transformación alotrópica permite obtener aleaciones con microestructuras de tipo α , β o $\alpha + \beta$, dependiendo de los elementos que estabilizan una u otra fase [21]:

MEMORIA

Estabilizadores alfa

Para obtener aleaciones de titanio alfa los principales aleantes son aluminio, oxígeno, estaño y circonio, pues se caracterizan en aumentar la temperatura beta transus. Las principales propiedades de estas aleaciones alfa son su buena resistencia mecánica, resistencia a la fluencia, soldabilidad y tenacidad¹. De entre todos los aleantes, el aluminio destaca por ser el que comúnmente se emplea en mayores cantidades (por encima del 8%), sin sobrepasarse, ya que puede resultar una aleación con fácil fragilización a temperaturas próximas a los 400–600°C [22].

Estabilizadores beta

Las aleaciones de titanio beta se obtienen a partir de dos tipos de aleantes estabilizadores: los beta isomorfos, que estabilizan la aleación beta para la temperatura ambiente, y los beta-eutectoides, con los que la fase beta se vuelve inestable a ciertas temperaturas por encima de la ambiente. Una medida común, para solventar esta inestabilidad, es tratar térmicamente este tipo de aleaciones. Aleantes como el manganeso, hierro, cromo, vanadio, molibdeno y niobio se encuentran entre los principales a la hora de obtener este tipo de aleaciones en fase beta [22].

Dado que la resistencia mecánica de un material disminuye a medida que la temperatura aumenta, teniendo en cuenta que la fase beta se obtiene como producto de la alta temperatura a la que se somete el material, la estructura resultante presenta una consecuente menor elasticidad que la alfa [18]. No obstante, cada estabilizador influye en la aleación proporcionándole unas u otras características de forma individual.

Además de las propiedades individuales de las dos fases α y β , otros factores de influencia en las propiedades de la aleación resultante son la disposición y la fracción de volumen que ocupan cada una de estas fases. Así pues la HCP de las α , a diferencia de las BCC de las β , poseen un empaquetamiento más denso y una microestructura anisótropa, además de las siguientes características:

- Mayor resistencia a la deformación plástica
- Mayor resistencia a la fluencia
- Baja ductilidad
- Bajo ratio de difusión
- Propiedades anisótropas mecánicas y físicas

¹ En el caso del oxígeno como aleante, forma una solución sólida intersticial que perjudica la tenacidad del material [22].

MEMORIA

La influencia en las propiedades de la aleación, de los estabilizadores de cada fase así como la distribución y disposición de las mismas, aparecen recogidas en la Tabla 3.1. Seguida de esta se proporciona una descripción y explicación en detalle de las diferencias o semejanzas existentes entre fases.

Respecto a los estabilizadores de cada una de las fases de las aleaciones de Ti, se propone ver el ANEXO III.

Tabla 3.1. Propiedades de las aleaciones de titanio α , $\alpha+\beta$ y β (adaptada de referencia [23])

	α	$\alpha+\beta$	β
Densidad	+	+	-
Resistencia	-	+	++
Ductilidad	-/+	+	+/-
Tenacidad de fractura	+	-/+	+/-
Resistencia a la fluencia	+	+/-	-
Comportamiento frente a la corrosión	++	+	+/-
Comportamiento frente a la oxidación	++	+/-	-
Soldabilidad	+	+/-	-
Trabajo en frío	--	-	-/+

Sobre la primera propiedad señalada, la densidad, las aleaciones α son menos densas que las β a consecuencia del peso específico de los estabilizadores empleados en su obtención. Mientras que las aleaciones β emplean estabilizadores más pesados como el molibdeno o el vanadio, las α emplean como estabilizador más importante el aluminio, que destaca por poseer la mitad de peso específico que el titanio.

En cuanto a las propiedades mecánicas, comenzando por la resistencia, de las fases existentes son normalmente, las aleaciones con única fase α , las que la presentan de forma más reducida. En cambio, las aleaciones bifásicas $\alpha+\beta$ y las aleaciones β metaestables (ver Figura 3.1) pueden ser endurecidas hasta alcanzar niveles considerablemente altos de resistencia.

En cuanto a la ductilidad, se señalan tendencias opuestas a las descritas en el caso de la resistencia, destacando el caso de las aleaciones β metaestables, en las que, como contrapartida a su alta resistencia, la ductilidad es menor, a no ser que se le aplique un tratamiento de endurecimiento artificial.

MEMORIA

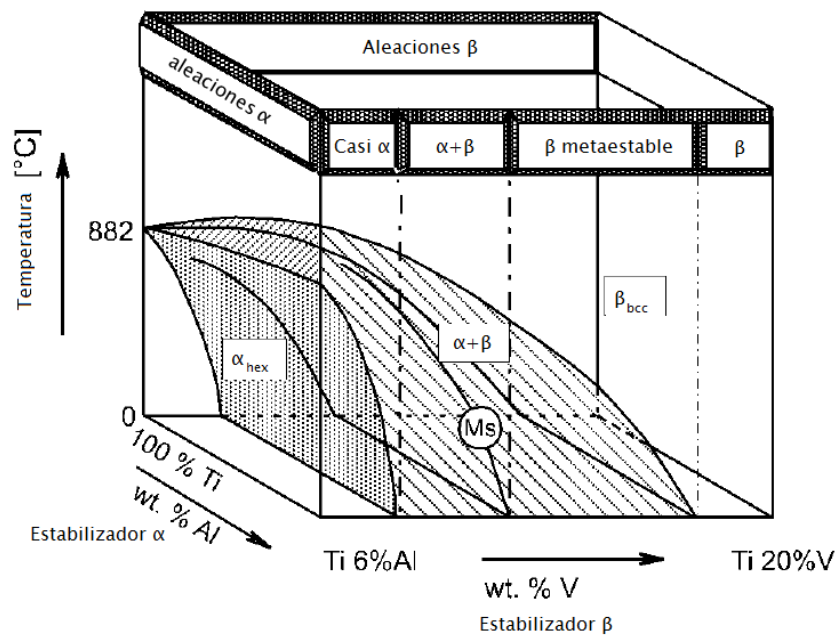


Figura 3.1. Esquema de un diagrama de fase en tres dimensiones de las aleaciones de titanio [23].

Las propiedades siguientes, la tenacidad de fractura y el comportamiento ante la fluencia, están fuertemente relacionadas con la microestructura de la aleación. Así pues, en el caso de la resistencia a la fluencia, se explica que las aleaciones β presenten un mejor comportamiento ante este fenómeno a consecuencia de la reducida capacidad de difusión de los átomos y de deformación de los cristales. En cuanto a la tenacidad de fractura, no existe una dependencia tan clara con el tipo de aleación, aunque si se destacan las aleaciones α como las más tenaces, quizás debido también a su mayor ductilidad.

Además de la fractura y la fluencia, otro fenómeno de relevante riesgo para el material es la oxidación. Como ya se ha comentado al inicio de este punto, entre las propiedades que destacan del titanio se encuentra su capacidad de crear, al entrar en contacto con el oxígeno, una fina y densa capa de óxido (TiO_2) protectora frente a la oxidación. La estabilidad de esta capa se ha mostrado como dependiente de la fase, siendo la correspondiente a la fase α más estable que la referente a la fase β .

Sin embargo, la reactividad con el oxígeno, así como con el hidrógeno, tienen como contrapartida la fragilización del titanio. Esto dificulta la soldabilidad del mismo, dado que solo sería posible llevar a cabo este proceso en vacío o atmósfera inerte. Aún con esta problemática, no todas las aleaciones presentan el mismo grado de complejidad a la hora de ser soldadas, siendo las fases α y $\alpha+\beta$ más fáciles de soldar que las β , especialmente si éstas están altamente endurecidas.

MEMORIA

Junto con la soldabilidad, otra propiedad tecnológica que se destaca en la Tabla 3.1 es la facilidad del material para ser trabajado en frío. Esta propiedad se muestra claramente dependiente de la microestructura, de tal forma que, a medida que aumenta el porcentaje de aleante β disminuye la temperatura de deformación. Así pues, algunas aleaciones β pueden ser deformadas incluso a temperatura ambiente, mientras que las aleaciones α y $\alpha+\beta$ sólo pueden ser deformadas a altas temperaturas.

3.3. Tratamientos térmicos y aleaciones

Con el principal objetivo de mejorar las cualidades del titanio, recogidas en el apartado anterior, y ampliar su rango de usos, se ha llevado a cabo en la industria una serie de prácticas entre las que se encuentran los tratamientos térmicos y termoquímicos.

Un ejemplo de proceso termoquímico empleado en la industria para el tratamiento del titanio es la nitruración². La aplicación de este tratamiento sobre aleaciones de titanio, particularmente las que presentan aluminio y vanadio como aleantes, produce una capa lisa y homogénea capaz de incrementar su dureza superficial hasta en un 500% respecto al titanio sin tratar. De esta forma además se mantiene la plasticidad del núcleo, lo cual facilita la absorción de golpes y vibraciones.

Otros tratamientos de tipo superficial aplicados al titanio son: la lubricación, la oxidación térmica o anodización y la ionización.

El empleo de la lubricación busca básicamente evitar el excesivo rozamiento entre la superficie de titanio con cualquier otro metal o el titanio mismo. Este consiste en aceitar las superficies usando lubricantes de película seca, como el disulfuro de molibdeno, que destaca por mantener buenas propiedades hasta en altas temperaturas [18].

El tratamiento de oxidación térmica o anodizado presenta, en cambio, una mayor complejidad pues consiste en la obtención de recubrimientos de óxidos de mayor espesor y con mejores propiedades mecánicas y anticorrosivas que los que ya se forman a temperatura ambiente. En la actualidad, destaca la oxidación con láser gracias a su rapidez y capacidad de acceder a zonas difíciles, lo cual ha convertido esta técnica en una alternativa frente a los métodos tradicionales [23]. Como resultado de emplear esta técnica sobre el titanio, este adquiere distintos tonos de coloración (ver Figura 3.2), lo

² Proceso consistente en la adición de nitrógeno a un material mientras éste es calentado. El nitrógeno además destaca por ser un elemento estabilizador de la fase alfa. Sin embargo, su uso excesivo puede incurrir en la fragilización extrema del material.

MEMORIA

que ha dado lugar a una nueva aplicación de este proceso en sectores como la joyería o la decoración.



Figura 3.2. Micrografías ópticas de probetas de la aleación de titanio Ti-6Al-4V oxidadas en aire durante diferentes intervalos de tiempo [21].

A diferencia del anodizado, la ionización se realiza en frío y consiste en impactar sobre la superficie tratada iones de nitrógenos acelerados en el vacío. De esta forma se consigue aumentar la dureza superficial hasta aproximadamente 1500HV [18], lo que convierte en ideal al material tratado en aplicaciones que requieran gran resistencia.

No solo se han utilizado tratamientos térmicos para mejorar las propiedades del titanio, sino que también se ha recurrido a alearlo con otros elementos, obteniendo así una amplia variedad de aleaciones, con propiedades determinadas por el uso y el proceso de obtención. Algunas de aleaciones de titanio más comunes, junto con una serie de aplicaciones de las mismas, aparecen recogidas en el ANEXO I mientras que en el ANEXO II aparecen algunos de los grados de clasificación de las aleaciones de titanio según la normativa internacional ASTM.

No obstante se deben destacar las aleaciones de titanio con vanadio, hierro y aluminio, dado su amplio uso en la industria médica y aeroespacial. Así mismo, también se emplean bastante las aleaciones $\alpha+\beta$ puesto que combinan las propiedades de ambas estructuras, siendo más resistentes a diferentes temperaturas y a la corrosión, aunque con una muy baja ductilidad.

3.3.1. Aleación Ti-6Al-4V

El Ti-6Al-4V es una aleación $\alpha+\beta$ (ver Figura 3.2) con propiedades de resistencia, ductilidad, comportamiento ante fractura y fatiga óptimas además de equilibradas, en comparación a otras aleaciones de fase α o β (ver Tabla 3.1). La composición química así como propiedades físicas y mecánicas del material, aparecen cuantificadas en la Tabla 3.2, la Tabla 3.3 y la Tabla 3.4 respectivamente.

MEMORIA

Tabla 3.2. Composición química de la aleación Ti-6Al-4V (UNS R56400) [24]

% peso	C	Fe	N	Al	O	V	H	Otros
Ti-6Al-4V	0,08	0,25	0,02	5,50-6,75	0,20	3,5-4,5	0,0125	0,40

Tabla 3.3. Propiedades físicas de la aleación Ti-6Al-4V (UNS R56400) [24].

Densidad (g/cm ³)	Temperatura de fusión (°C)	Temperatura beta transus (°C)	Módulo Elástico (E) (GPa)	Coefficiente de expansión térmica (10 ⁻⁶ /°C)
4,43	1650	996	114	9-11

Tabla 3.4. Propiedades mecánicas de la aleación Ti-6Al-4V (UNS R56400) [24].

Límite elástico (MPa)	Resistencia a la tracción (MPa)	Dureza HRC	Elongación	Resistencia a fatiga a 600 MPa (ciclos)
795	860	30-35	>10	>1000000

Esta aleación, que acapara el 50% del titanio, fue desarrollada en los años 50 en el Instituto Tecnológico de Illinois, EEUU. Desde entonces se ha convertido en una de las aleaciones de titanio más recurrentes en el sector aeroespacial, el cual consume el 80% de esta aleación mientras que el 20% restante engloba a aplicaciones médicas, químicas y de automoción entre otras.

Son dos las razones principales del éxito de esta aleación: en primer lugar, el buen equilibrio entre sus propiedades, tal y como puede verse en la Tabla 3.1, y por otro lado, el amplio estudio y desarrollo de esta aleación, especialmente en el sector aeronáutico, proporcionándole cierta ventaja sobre las demás aleaciones.

El papel que ejercen sus aleantes en la definición de sus propiedades, consiste en mejorar la dureza y resistencia mecánica de la misma. Así pues el 6% de aluminio aumenta la resistencia de la fase α mediante un mecanismo de endurecimiento por precipitación sólida, mientras que el 4% de vanadio se endurece por precipitación durante la maduración. Debe considerarse que el relativamente alto contenido en estabilizador α es tanto beneficioso, pues proporciona tal incremento de la resistencia a la temperatura de servicio, como perjudicial desde el punto de vista de su conformabilidad en frío (ver Tabla 3.1).

Su aplicabilidad en la industria médica queda justificada por la ya mencionada biocompatibilidad que posee esta aleación en contacto con tejidos o huesos. En cuanto

MEMORIA

al caso aeroespacial, la ligereza, resistencia corrosiva y buenas propiedades mecánicas que ofrece la aleación Ti6Al4V (ver ANEXO I), la han convertido en un recurrente de numerosas aplicaciones.

3.4. Aleaciones de titanio para aplicaciones aeronáuticas

A continuación, se detallan algunas de las aplicaciones en la que se puede encontrar el titanio dentro de una aeronave.

3.4.1. Aleaciones de titanio para aeronaves

A consecuencia de su alta resistencia específica y su buen comportamiento ante la corrosión, ya mencionadas en el apartado 8.2, las aplicaciones aeronáuticas de las aleaciones de titanio, son aquellas en las que otros materiales como las aleaciones de aluminio o las superaleaciones no resultan adecuadas. Motivo de esta inaptitud es la falta de equilibrio o compensación entre esta resistencia mecánica, resistencia a la corrosión y/o estabilidad a altas temperaturas y el peso del material. En este sentido, las principales razones del uso de titanio en aeronáutica son:

- Reducción de peso (en sustitución del acero y a las aleaciones de níquel)
- Temperatura (en sustitución de las aleaciones de aluminio, níquel y aceros)
- Compatibilidad galvánica con materiales compuestos de matriz polimérica (sustituyendo a las aleaciones de aluminio)

Mediante el diagrama de la Figura 3.3, se representa el porcentaje estructural para varios materiales en aeronaves comerciales modernas, distinguiendo entre materiales estructurales y los empleados en los motores de las aeronaves. Observando el correspondiente a materiales estructurales, se destaca como el aluminio sigue siendo el material más empleado en la construcción de aeronaves (aproximadamente, dos tercios del fuselaje de un A330/340 está fabricado a partir de aleaciones de aluminio) [23]. Sin embargo, más de un tercio del peso estructural de una turbina de una aeronave está hecho de titanio, siendo el segundo material más empleado.

Otro factor a tener en cuenta además de las propiedades es el coste total – incluido adquisición y todo el proceso de producción del componente deseado – considerándose este como determinante a la hora de seleccionar el material. Particularmente, lo que impera en la industria aeroespacial es seleccionar el material de acuerdo a sus costes de implementación, mantenimiento y reparación dentro del ciclo de vida de un componente en cuestión.

MEMORIA

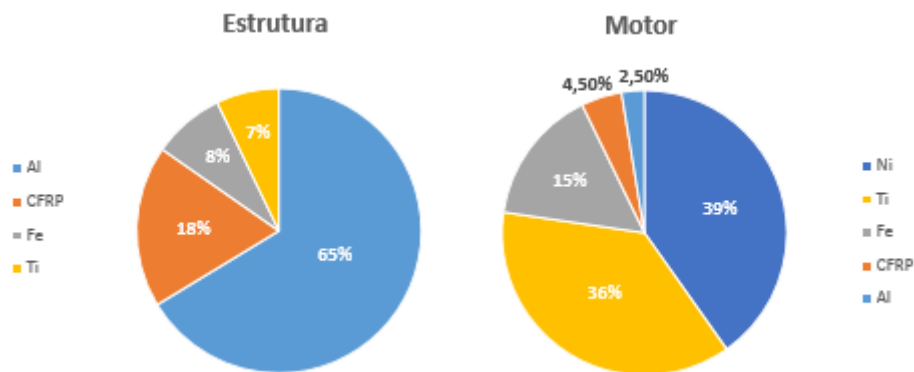


Figura 3.3. Porcentaje de aluminio, titanio, aceros y materiales compuestos CFRP en peso estructural tanto para la estructura del avión como para la planta motora (adaptada de [23]).

Las aplicaciones del titanio dentro del sector aeronáutico se recogen en los siguientes apartados.

3.4.2. Estructura

El ahorro de peso es motivo suficiente para la elección de las aleaciones de titanio como material empleado en aplicaciones relacionadas con el fuselaje, teniéndose en cuenta además la buena resistencia mecánica del metal (aunque también las aleaciones de aluminio son frecuentemente recurridas en este aspecto). Esto ha permitido el incremento del uso de las aleaciones de titanio durante las últimas cuatro décadas, como se puede observar en la Figura 3.4. Este gráfico muestra el crecimiento del uso del titanio en aeronaves comerciales de la compañía *Boeing*®, desde la introducción del titanio como material estructural allá por los años 50, hasta la actualidad en la que ha llegado a alcanzar un 15% del peso estructural de un B787. Esta progresión es semejante en el caso de los modelos fabricados *Airbus*®.

En cuanto a las aplicaciones estructurales de este material, se destaca su uso como elemento de contención ante el crecimiento de grietas por fatiga en la estructura del fuselaje. La forma en la que se consigue esto último es mediante la incorporación del titanio en forma de anillos de poca anchura y espesor alrededor de la estructura de aluminio.

Actualmente también se está llevando a cabo la sustitución del empleo de hierro en tuberías hidráulicas por aleaciones de titanio en su lugar. Esto se debe a la mayor ligereza de las aleaciones de titanio, cuyo empleo permite una reducción de un 40% en peso. Entre las diferentes aleaciones de titanio es la aleación $\alpha+\beta$ Ti-3Al-2.5V la seleccionada para este cometido, gracias a su relativa facilidad de deformación y su buena resistencia mecánica.

MEMORIA

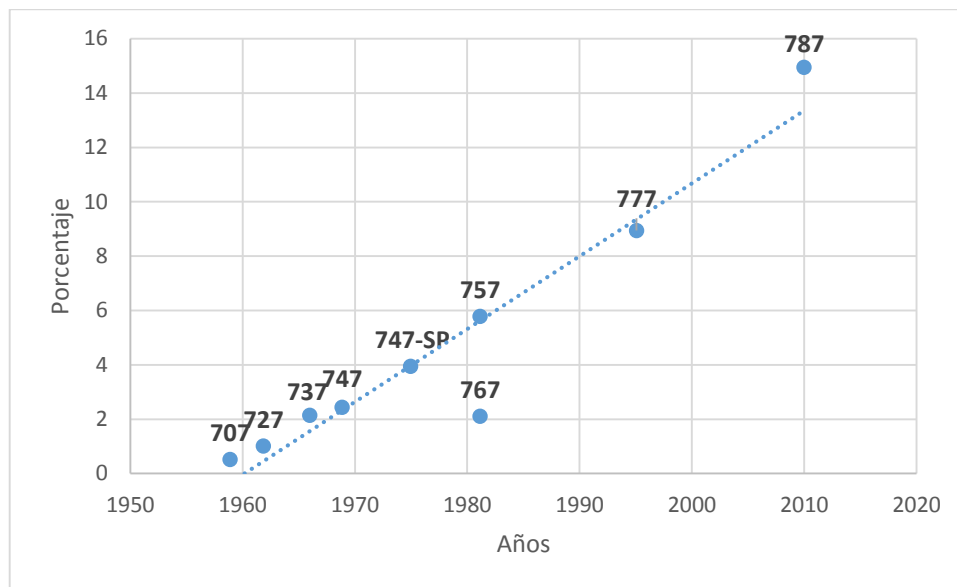


Figura 3.4. Porcentaje, en relación al peso en vacío, de titanio en aviones comerciales de Boeing (adaptado de referencia [23]).

Por otro lado el titanio también se emplea sin ningún tipo de aleante en aquellas aplicaciones donde se requiera una alta resistencia frente a la corrosión junto con una moderada resistencia mecánica, siendo empleado en estos casos el titanio puro en sus grados 3 y 4 (ver ANEXO II). Ejemplo de estas aplicaciones son los alrededores de los suelos de las cocinas y los baños instalados a bordo así como de las tuberías correspondientes al sistema de deshielo, último caso en el que la estabilidad térmica del material es vital [23].

Otra ventaja que presenta el titanio frente a otros materiales son los reducidos costes de mantenimiento de las piezas que se fabrican con él, amortizando a largo plazo los altos costes de fabricación con este material. Esto ha justificado que en modelos de avión, como el B777, se consideren las aleaciones de titanio en la fabricación de los elementos primarios del tren de aterrizaje, en lugar del acero de alta resistencia necesitados de ser remplazados durante la vida útil de la aeronave [23]. A parte del ahorro en costes de mantenimiento, el empleo de titanio conlleva un ahorro de peso estimado en 270kg por avión. Un ejemplo de las dimensiones de estos componentes se puede apreciar en la Figura 3.5.

A consecuencia de la exposición a grandes cargas, como pueden ser las ocasionadas por el impacto de aves, las lunas de la cabina presentan marcos fabricados de aleaciones de titanio (Figura 3.6). De forma similar, las aleaciones de titanio son también empleadas en el ensamblaje de las piezas de CFRP de la estructura, tanto del estabilizador vertical como del horizontal. El motivo de esta aplicación se encuentra en que el coeficiente de

MEMORIA

expansión térmica del titanio es más parecido al de la matriz polimérica del material compuesto que la del aluminio. Por otro lado, las aleaciones de titanio son químicamente más compatibles con la fibra de carbono que con el aluminio, evitándose así problemas de corrosión galvánica.



Figura 3.5. Componente del tren de aterrizaje principal de un B777 fabricado en TIMETAL 10-2-3 (Ti-10V-2Fe-3Al) [23].

A diferencia de la aviación comercial, las aleaciones de titanio gozan de un mayor empleo en el mercado de la aviación militar. Las grandes cargas térmicas y mecánicas experimentadas por aeronaves de esta naturaleza a velocidades supersónicas y en la realización de ciertas maniobras, justifican el uso masivo de este material. La proporción de titanio en el fuselaje de una aeronave de estas características puede llegar a sobrepasar el 50%, destacándose el caso del SR-71 "Blackbird" donde esta proporción es del 95% [23].

A día de hoy el titanio representa el 35-50% del peso de una aeronave de combate moderna. La zona más común donde se localiza el titanio es en el motor, donde rápidamente se pueden exceder temperaturas más allá del margen capaz de soportar aleaciones de otros materiales como el aluminio. El empleo del titanio en estas estructuras ha sido posible gracias a nuevas técnicas de conformado, como el conformado superplástico o SPF-DB (Superplastic Forming and Diffusion Bonding) sustituyéndose a la forja como medio de obtención de las aleaciones empleadas. De esta forma se consigue el ahorro en peso mediante la eliminación de uniones remachadas o atornilladas.

MEMORIA



Figura 3.6. Marcos de las lunas correspondientes a la cabina de un avión comercial fabricada en Ti-6Al-4V [23].

3.4.3. Turbina de gas

Las turbinas de gas constituyen la principal área de aplicación de las aleaciones de titanio en el sector aeroespacial, llegándose a emplear estas aleaciones en aproximadamente un tercio del peso estructural de la turbina. Su uso y continuada presencia en el sector ha ido en aumento desde que *Pratt & Whitney*® y *Rolls-Royce*® lo introdujesen en 1950 (ver Figura 3.7).

En cuanto a los componentes específicos de la turbina fabricados en titanio destacan los álabes y discos del compresor, pioneros en el empleo de este material. Otro componente perteneciente a la turbina en el que se emplea el titanio es el disco del fan, encargado de mantener unidos a todos los álabes. En todos estos componentes, la aleación en concreto que se emplea es Ti-6Al-4V, localizable en una amplia variedad de aplicaciones ajenas a la planta propulsora, a consecuencia de su buen equilibrio entre propiedades. En la Figura 3.8 se puede observar la escala de estos componentes de la serie Trent de *Rolls-Royce*®.

En cambio para zonas como la cámara de combustión y turbina, en las que se pueden alcanzar temperaturas considerablemente altas, se emplean otras aleaciones de titanio, como son Ti-8Al-1Mo-1V y Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo. Estas destacan por su resistencia a altas temperaturas y buen comportamiento ante fatiga. Un ejemplo de aplicación de estas aleaciones puede ser el compresor de alta presión de un turbofan (ver Figura 3.9).

MEMORIA

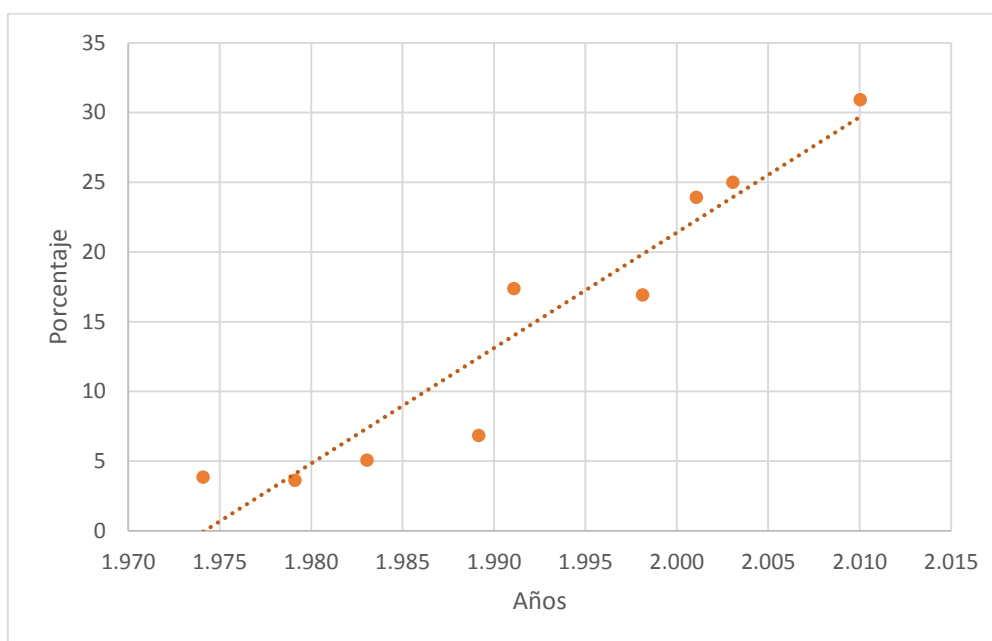


Figura 3.7. Porcentaje del peso total de motores Rolls-Royce correspondiente al titanio [23].



Figura 3.8. Frontal de los turbofans de motores Trent de Rolls-Royce hechos de Ti-6Al-4V [23]

MEMORIA

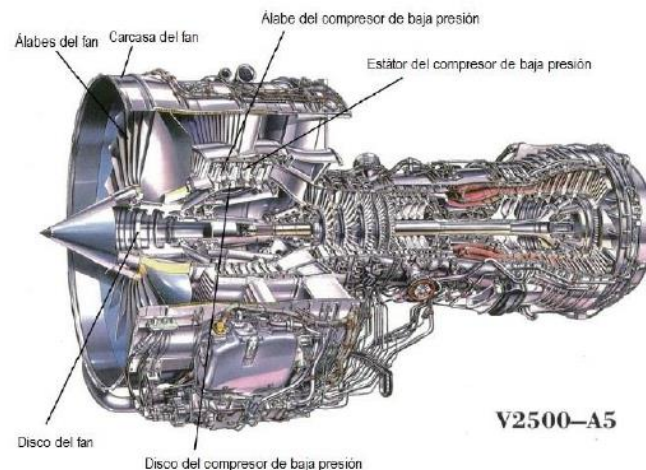


Figura 3.9. Esquema de componentes pertenecientes a un turbofan [16].

A medida que han pasado los años, se han requerido mayores temperaturas de servicio a las aleaciones de titanio. En un principio se optó por el empleo de aleaciones basadas en níquel, provocando el consecuente aumento del peso de la aeronave. Sin embargo, parece haberse encontrado en los últimos años una alternativa a las aleaciones en base níquel; un tipo de titanio cerca de la fase α de elevada temperatura. Ejemplo del estado del arte de este material es la aleación IMI834 (Ti-5.8Al-4Sn-3.5Zr-0.7Nb-0.5Mo-0.35Si), desarrollada en conjunto entre la empresa inglesa *IMI Titanium Ltd.* y *Rolls-Royce®* en 1980, capaz de soportar hasta 600°C en servicio (ver Figura 3.10). Posteriormente, y a consecuencia de la adquisición de *IMI* por parte de *Titanium Metal Corporation (TIMET)*, esta aleación pasa a comercializarse con el nombre de TIMETAL834 estando presente desde entonces, en la mayoría de los motores de aviones de combate europeos. En la actualidad, también se emplea en la fabricación del disco del compresor de alta presión correspondiente a las variantes de motores comerciales Trent de *Rolls-Royce®*.

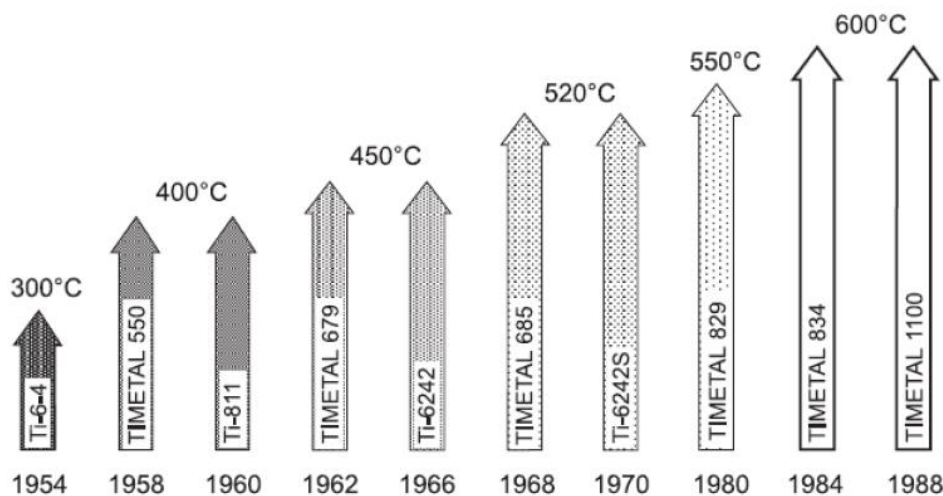


Figura 3.10. Desarrollo de las aleaciones de titanio en función de su temperatura máxima de servicio [23].

MEMORIA

3.4.4. Helicópteros

El uso de las aleaciones de titanio en helicópteros está destinado precisamente al componente que mayor esfuerzo experimenta: la cabeza del rotor. Diferenciando entre aleaciones, la empleada más comúnmente es la aleación de Ti-6Al-4V (ver Figura 3.11). Sin embargo, estudios recientes en aleaciones β de alta resistencia mecánica conducen a una probable sustitución del Ti-6Al-4V por estas aleaciones, como ya ocurre en el helicóptero Westland Super Lynx de la empresa aeronáutica *Westland Helicopters*®. Otros ejemplos de esta situación son programas como el US RAH-66 Comanche, donde se emplea TIMETAL 10-2-3 para el mástil y cabeza del rotor, y el V-22 Osprey, donde se emplea este tipo de aleaciones en el ensamblaje de los motores.

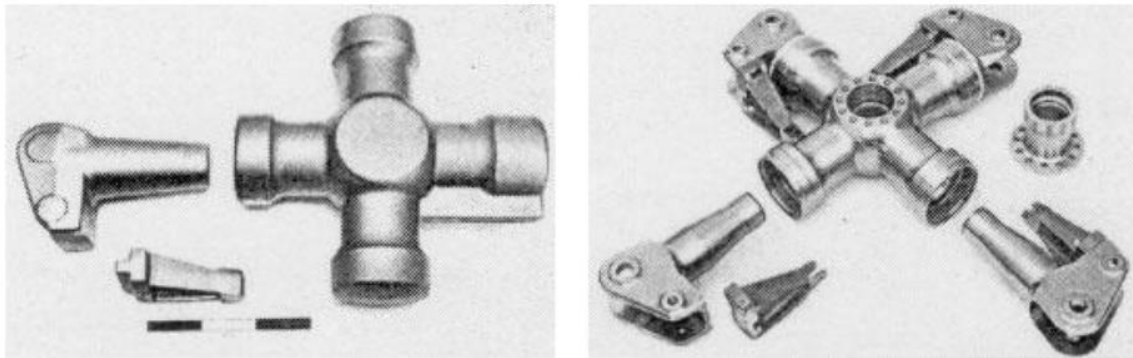


Figura 3.11. Componentes de la cabeza de los rotores de los helicópteros BO105 y BK117 de Eurocopter fabricados en Ti6Al4V [23]

3.4.5. Espacio

Las aeronaves espaciales tienen una carga de pago muy pequeña respecto a otros vehículos, lo que convierte el ahorro de peso en un aspecto de alta relevancia. Una de las aplicaciones espaciales más comunes del titanio se encuentra en los tanques de combustible de esta clase de vehículos (ver Figura 3.12). Este uso del titanio es debido principalmente a la alta compatibilidad en la mayoría de casos con el combustible además de por su bajo peso y resistencia mecánica. La Figura 3.12 muestra los tanques presurizados hechos de titanio para el programa Shuttle de la NASA.

MEMORIA



Figura 3.12. Tanques presurizados hechos de titanio para el programa Shuttle de la NASA [23].

Capítulo 4

4. Mecanizado por arranque de virutas

El mecanizado es todo aquel proceso de conformado con el que se proporciona una determinada forma y dimensión a la pieza a obtener mediante la eliminación del material sobrante. Para separar el material sobrante se requiere del empleo de una fuerza-energía. Según la fuente de energía aplicada, el mecanizado puede diferenciarse en aquellos mediante acción no mecánica (térmica, química, etc) y en los que la fuerza aplicada si es de origen mecánico, es decir, si se aplica una acción mecánica. Así mismo, existe una gran variedad de criterios en la clasificación de los procesos de mecanizado, siendo el tiempo de aplicación o la forma del material arrancado algunos de los más extendidos. No obstante estos criterios dan lugar a clasificaciones bastante comunes, en las que se pueden diferenciar a su vez dos grandes grupos:

- Procesos de mecanizado convencionales
- Procesos de mecanizado no convencionales

El mecanizado por arranque de virutas se clasificaría como aquellos procesos de mecanizados convencionales o tradicionales. Dentro de este tipo de mecanizado se pueden diferenciar, entre los más comunes, el fresado, el taladrado, el roscado o el torneado.

Dado el empleo de este último, el torneado, para la preparación de las probetas a rectificar, se reserva este capítulo, del estado del arte, a la aplicación de este proceso de mecanizado por arranque de virutas en el conformado de titanio, con idea de exponer aquellos aspectos del mismo que pueden ser relevantes en los resultados obtenidos.

4.1. Mecanizado de titanio por arranque de viruta

Aunque prácticamente se puedan considerar los mismos criterios para el mecanizado de titanio como para cualquier metal común, en su caso existen ciertas restricciones a consecuencia de las propiedades físico-químicas tan peculiares de este material. Estas propiedades y el cómo afectan al proceso pasan a ser descritas a continuación:

- La baja conductividad térmica del titanio impide una rápida disipación del calor producido por el mecanizado. Esto da lugar a un mayor desgaste de las herramientas.

MEMORIA

- El bajo módulo de elasticidad del titanio implica una considerable recuperación de la pieza tras la deformación bajo tensiones. Esto impide el alineamiento entre la herramienta y la pieza durante el mecanizado.
- Su alta reactividad química acompañada de su relativa baja dureza, conllevan la tendencia del titanio a adherirse a la herramienta de corte.

A razón de estas dificultades, se establecen ciertas pautas con objeto de conseguir un mecanizado exitoso de las piezas de titanio [23]:

- Las herramientas de corte a usar deben estar afiladas y ser reemplazadas al primer signo de desgaste pues, por muy pequeño que este sea, el fallo de la herramienta ocurre muy rápidamente.
- Las pasadas del torneado se deben realizar a alta velocidad de avance y baja velocidad de corte. En el caso del avance, este dependerá de la cantidad de material a eliminar así como de los requerimientos de acabado superficial, siendo necesario pues un mayor avance para mayores cantidades de material a eliminar y avances más pequeños para obtener un buen acabado superficial.
- Debe asegurarse la correcta lubricación de las piezas de titanio mediante el uso de copiosas cantidades de fluido de corte. Esto permite la rápida disipación del calor así como la prevención de la aparición de fuego, puesto que, al salir la viruta incandescente, existe bastante riesgo de incendio.
- La pieza de trabajo debe ser tan pequeña como sea posible además de ir montada en un dispositivo libre de vibraciones de la máquina.
- En el caso concreto del torneado se requiere que este y los agarres sean resistentes.

En cuanto al material de la herramienta, se destaca el acero-cobalto como el mayormente empleado a causa de su flexibilidad y bajo coste. No obstante, superficies rugosas o el mecanizado a altas velocidades pueden requerir cierto tipo de herramientas con mejores prestaciones, como es el caso de las aleaciones cobalto-cromo o las de carburo cementado.

4.2. Torneado de titanio

Los requerimientos expuestos anteriormente están comprometidos por el equipo, como ocurre con el caso de la velocidad de corte. Aunque sea recomendable una velocidad de corte baja debe tenerse en cuenta el rango de velocidades de la máquina puesto que pueden no estar disponibles las bajas velocidades necesarias para mecanizar titanio, caso común en tornos convencionales.

MEMORIA

Consecuentemente el uso de maquinaria de control numérico (CNC) es normalmente la adecuada en el mecanizado de titanio, gracias a la posibilidad de optimizar las variables del proceso, así como de proporcionar una mayor rigidez y control de las vibraciones durante el torneado.

La descripción geométrica de la herramienta (ver Figura 4.1) favorece el estudio del proceso. Así pues los ángulos de la herramienta son relevantes para aumentar la disipación del calor todo lo posible, controlar el flujo de viruta y disminuir las manchas sobre el metal. La inclinación de estos ángulos así como el ángulo correspondiente a los lados de corte determinan el ángulo de inclinación de la herramienta y la forma del flujo de viruta. Así mismo, el ángulo de la cara de corte influye a la temperatura del proceso mediante el control de la zona de contacto entre la pieza, herramienta y viruta.

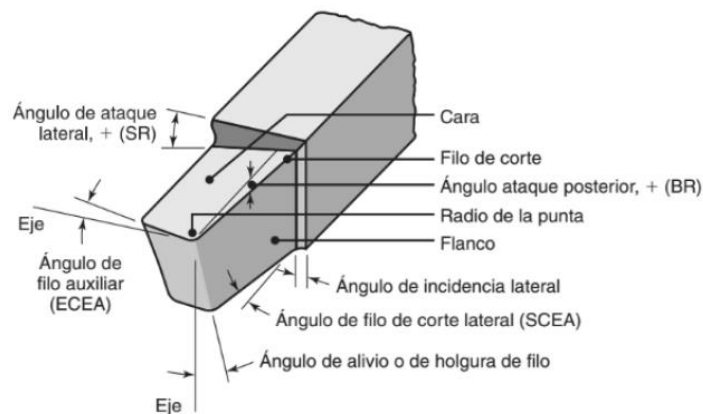


Figura 4.1. Geometría de una herramienta convencional de corte para torno [26].

En la selección de material se descartan las herramientas cerámicas [25], así como se deben considerar también las pautas indicadas en el apartado 4.14.1. . Aun así y, como se mencionase también en el apartado anterior, los materiales de las herramientas más empleados para mecanizar titanio son: los aceros de alta resistencia (HSS), carburo cementado y aleaciones por moldeo.

- Los aceros de alta resistencia: se comportan mejor en cortes de forma, cortes interrumpidos y condiciones de poca rigidez.
- Las herramientas de carburo: son las más sensibles al desgaste por lo que se requiere una reducción de las vibraciones de la máquina y una mayor rigidez en el montaje de la herramienta.

En caso de que las condiciones señaladas para el empleo de herramientas de carburo no se den, se emplearían en su lugar las herramientas de acero, existiendo también como alternativa el empleo de aleaciones por moldeo como las de cobalto-cromo.

MEMORIA

Para la selección de la profundidad de corte se considera, de igual forma que con la velocidad de avance, la cantidad de material que se quiera eliminar. Así pues si se busca realizar una pasada de desbaste, la punta de la herramienta deberá traspasar toda capa superficial o de óxido que haya resultado de operaciones llevadas a cabo en procesos previos. En cambio, para lograr un buen acabado, la profundidad de corte deberá ser pequeña con el fin de obtener el mejor acabado posible y cumplir con las tolerancias. Por motivo de la influencia de la profundidad y la velocidad de avance con el acabado superficial, en caso de llevarse a cabo un proceso de acabado posterior (como puede ser el rectificado) se puede optimizar ambos parámetros en aras de facilitar el cumplimiento de las tolerancias de la pieza tras dicho proceso de acabado.

Para acabar, respecto a los fluidos de corte se destaca su amplio uso en operaciones de torneado de titanio para facilitar la expulsión o evacuación de virutas, así como, la refrigeración de la herramienta. De esta forma pues, se pretende la reducción del desgaste de la herramienta, el cual puede ocurrir en este proceso de torneado de las formas descritas en el siguiente apartado.

4.2.1 Mecanismos de desgaste en torneado

En un proceso de mecanizado se dan unas condiciones extremas en las superficies que intervienen en el proceso. Aparecen altas temperaturas así como un estrés mecánico dadas las altas cargas que intervienen. Esto es debido a la interacción de la viruta con la herramienta, produciéndose una fricción entre ambas y desencadenándose un cambio en la herramienta, es decir, un desgaste.

Los mecanismos responsables de este desgaste son extremadamente complejos y depende de multitud de factores como pueden ser los materiales de la herramienta y la pieza, las geometrías que intervienen, los parámetros de corte (velocidad, avance, profundidad...), etc... [27]. No obstante, la gran mayoría de autores coinciden en la determinación de cuatro mecanismos básicos de desgaste:

- Mecanismo de Adhesión: Consiste en la adhesión de material, bien de la herramienta a la pieza (adhesión primaria) o bien de la pieza a la herramienta (adhesión secundaria), a consecuencia de las altas temperaturas alcanzadas en la superficie de contacto herramienta-pieza.
- Mecanismo de Abrasión: Consiste en la erosión y arranque de partículas de material de la herramienta, a consecuencia de la acción de partículas duras o abrasivas.

MEMORIA

- **Mecanismo de Difusión:** Tiene lugar cuando átomos procedentes de la red cristalina, bien de la herramienta o de la pieza metálica, se trasladan a la superficie en contacto con la que presenta afinidad química. Este proceso se ve bastante influido por la temperatura, pues a mayor valor de esta, mayor es el flujo de átomos difundidos.
- **Mecanismos Electroquímicos:** Este mecanismo de desgaste engloba a diferentes mecanismos químicos, de corrosión y oxidación, así como, la combinación de los mismos.

Por otro lado, se encuentran además otros mecanismos que ocurren por una acción puramente mecánica, como pueden ser de estrés o fatiga y que aparecen de una forma mucho más concreta [28].

Además, cualquiera de estos mecanismos de desgaste no suelen aparecer de forma aislada. Esto implica en una dificultad mayor a la hora de dar solución a esta problemática, que afecta negativamente tanto a la vida de la herramienta como a la calidad de las piezas obtenidas.

El torneado de titanio es un claro ejemplo de la combinación o sinergia entre diferentes mecanismos de desgaste, en el caso de que condiciones del proceso – como la refrigeración – no sean las adecuadas, lo que dificulta la identificación y cuantificación del desgaste en el mecanizado de aleaciones de este material. Así pues, las altas temperaturas alcanzables darían lugar a la aparición, en la herramienta, de una primera capa de óxido de titanio sobre las que se adhieren fragmentos de la viruta. Esto generaría una estratificación bastante inestable, tanto en la cara de desprendimiento y filos de la herramienta, susceptibles de ser arrancados, llevándose consigo material de la propia herramienta [29].

4.2.2 Torneado en seco

Hoy en día el proceso de torneado, y especialmente en titanio, va acompañado del uso de lubricantes. Sin embargo, las normativas medioambientales actuales están haciendo evolucionar los procesos hacia su sostenibilidad. Esta evolución se sustenta en el uso de una cantidad mínima de lubricante o a carecer de ello, es decir, a mecanizar en seco [30] siendo esta última alternativa una apuesta clara de futuro.

El torneado en seco ha carecido tradicionalmente de amplio uso en la industria al ser considerada como no recomendable en operaciones de acabado o semiacabado. Así pues su empleo se ha visto limitado a ocasiones muy puntuales donde la viruta no pueda

MEMORIA

ser contaminada con el fluido refrigerante o cuando se ha necesitado preparar la pieza para otro tipo de mecanizado [26].

El principal inconveniente o dificultad a la hora de no aplicar ningún tipo de lubricación es las altas temperaturas alcanzadas, y en consecuencia el alto grado de desgaste de la herramienta, según lo recogido en el apartado anterior. No obstante existen estudios [29] en los que se evalúan y posibilitan una metodología a seguir para el torneado en estas condiciones. Así pues establecen ciertas condiciones como el material de la herramienta o los parámetros de corte seleccionables.

Sobre la herramienta, el material de las mismas debe cumplir con ciertos requerimientos de dureza, tenacidad, así como, de resistencia a los cambios de temperatura y conductividad térmica, suficientes para soportar las deformaciones, intermitencias – originadas por la forma de la viruta o vibraciones – y altas temperaturas respectivamente.

Finalmente, respecto a los parámetros de corte existe una mayor variabilidad de criterios dependiendo de variables como el material de la pieza a mecanizar. Así pues para el caso concreto del torneado en seco de titanio – más concretamente de la aleación UNS R56400 – se puede observar a partir de la Tabla 4.1 como influyen diferentes parámetros del proceso – tales como la profundidad, avance, velocidad de corte y el tiempo de mecanizado – en diferentes mecanismos de desgaste, así como, en el acabado superficial de la pieza, según el parámetro de rugosidad Ra [29]. A partir del análisis de esta tabla, se puede determinar que el torneado en seco es posible, al menos en un material de tan difícil maquinabilidad como es el titanio (UNS R56400), siempre y cuando se escojan parámetros de corte bastante conservadores.

Tabla 4.1. Resumen comparativo de los diferentes mecanismos de desgaste y de la rugosidad (Ra) en función de parámetros relativos al torneado en seco de titanio (adaptada de [29])

Parámetro	↑ Avance	↑ Velocidad	↑ Profundidad	↑ Tiempo
Abrasión	↓	↔	↑	↑
Adhesión	↑	↑	↔	↑
Desg. Flanco	↑	↑	↓	↑
Oxidación	↑	↑	↑	↔
Ra	↑	↓↔	↓	↓

Capítulo 5

5. Procesos de mecanizado abrasivo

Dentro de los procesos de mecanizado con acción mecánica, además de los procesos por arranque de viruta ya comentados en el capítulo anterior, se clasificarían aquellos procesos en los que la acción mecánica se realiza mediante microimpactos sobre la pieza. Caso particular de este tipo de procesos es el mecanizado por abrasivo, sobre el cual se centra este capítulo.

El mecanizado abrasivo es uno de los pasos finales en la producción de una pieza. Consta de una serie de procesos capaces de proporcionar una alta precisión dimensional y un buen acabado superficial. En este apartado se describen algunos de los procesos de mecanizado abrasivo más comunes, haciéndose una clasificación por el tipo de herramienta que se emplee en cada uno de ellos.

Existen situaciones, y mucho más en el mundo de la aeronáutica, en las que se exigen unas tolerancias y unos niveles de acabados muy altos. Uno de los mejores métodos para cumplir con estas demandas es el mecanizado abrasivo, y más concretamente, el rectificado. El término mecanizado abrasivo normalmente hace referencia a los procesos en los que el material se elimina mediante abrasivo en forma de multitud de granos o partículas orientadas aleatoriamente que pueden estar aglutinados o no y que forman una herramienta con una geometría definida [31]. Una partícula de abrasivo suele ser dura y estar formada por aristas afiladas con forma irregular. Esto marca una gran diferencia con respecto a las herramientas de corte utilizadas en otros métodos de mecanizado, como el torneado, fresado, etc.

Desde tiempos remotos, los procesos abrasivos han sido de gran importancia porque son capaces de producir superficies muy bien controladas y, si se lleva a cabo correctamente, también pueden lograrse tolerancias muy estrechas. Por ejemplo, las tolerancias dimensionales pueden ser menores a $1\text{ }\mu\text{m}$ y las rugosidades superficiales pueden ser tan finas como $0,025\text{ }\mu\text{m}$ [26]. En la Figura 5.1 se pueden apreciar los procesos que se enmarcan dentro del mecanizado abrasivo.

MEMORIA

A pesar de que este trabajo trata sobre el rectificado, el cual será expuesto en el Capítulo 6 con mayor profundidad, se describen a continuación algunos procesos de mecanizado abrasivo que también se emplean en la industria.

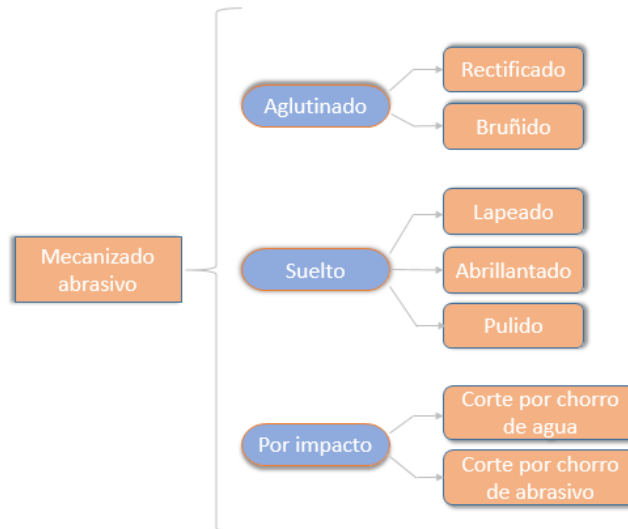


Figura 5.1. Clasificación de los procesos abrasivos [31].

5.1. Bruñido

El bruñido es una operación que se utiliza principalmente para mejorar el acabado superficial producido por procesos como el mandrinado, el taladrado o el rectificado interno. La herramienta está provista de unas barras de abrasivo compactado tal y como se aprecia en la Figura 5.2 conocidas comúnmente como piedras. Se montan en un mandril que gira dentro del orificio a velocidades desde 45 hasta 90 m/min, aplicando una fuerza radial [26]. La herramienta también posee un movimiento axial que produce un patrón cruzado en la superficie del orificio. Las piedras pueden regularse para diferentes tamaños de orificios.

Los fluidos de corte más empleados para este proceso son base agua o aceite. En ocasiones específicas, el bruñido también se puede aplicar a superficies externas, tanto planas como cilíndricas, como puede verse en la Figura 5.3. Para estos casos, se le añade un movimiento vibratorio a la herramienta. La trayectoria es una línea ondulada con desplazamiento helicoidal en la periferia de la pieza mecanizada. La curvatura de la herramienta se amolda a la de la pieza que, junto con el movimiento triple, se mejora la forma geométrica no solo en sentido axial sino también circular.

MEMORIA

Se puede controlar la calidad del acabado superficial producido por este proceso mediante el tipo y el tamaño del abrasivo utilizado, la presión aplicada, la velocidad y el fluido de corte. Si no se realiza de forma correcta, el bruñido puede producir orificios que no sean rectos ni cilíndricos.

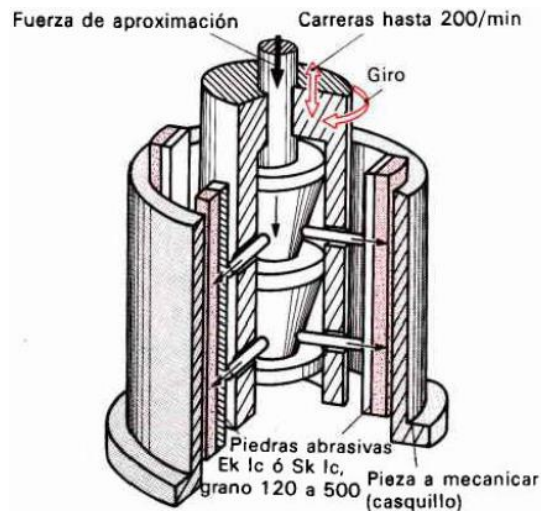


Figura 5.2. Esquema de una herramienta para el bruñido [32].

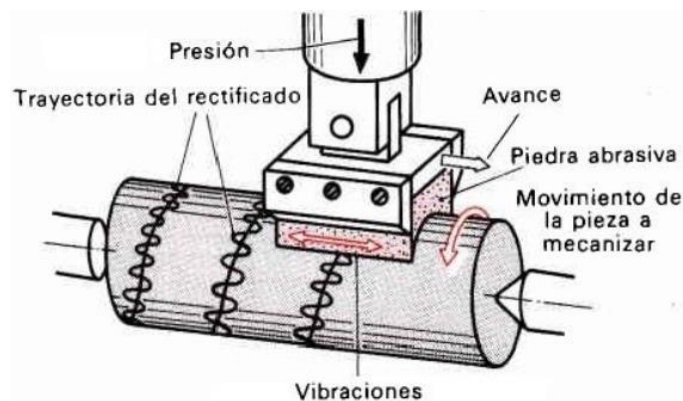


Figura 5.3. Proceso de bruñido exterior para una pieza cilíndrica [32].

5.2. Lapeado

El lapeado es un proceso de mecanizado con arranque de viruta mediante abrasivos sueltos y sin compactar. Es apropiado para conseguir una exactitud de forma y una calidad de acabado superficial altas y una estrecha tolerancia de medidas. La herramienta de lapeado (Figura 5.4) es relativamente blanda y porosa (*lap*), y por lo general se fabrica con hierro fundido, cobre, piel o tela. El elemento abrasivo en forma de gránulo, carburo de silicio, carburo de boro o diamante, con un tamaño de grano muy fino, se mezcla con un líquido conocido como líquido o medio de lapear. Este

MEMORIA

líquido se introduce entre las superficies de la pieza y el disco de lapear, las cuales se mueven una contra otra con una pequeña presión (dependiendo del tipo y la dureza del material de la pieza de trabajo, las presiones de lapeado van de 7 a 140 kPa), produciéndose así el arranque de viruta en ambas superficies. La superficie de la pieza de trabajo es la que más sufre ya que los granos de abrasivo actúan como filos de cuchilla sobre ella, mientras que se asientan en la superficie blanda o porosa del disco de lapeado.

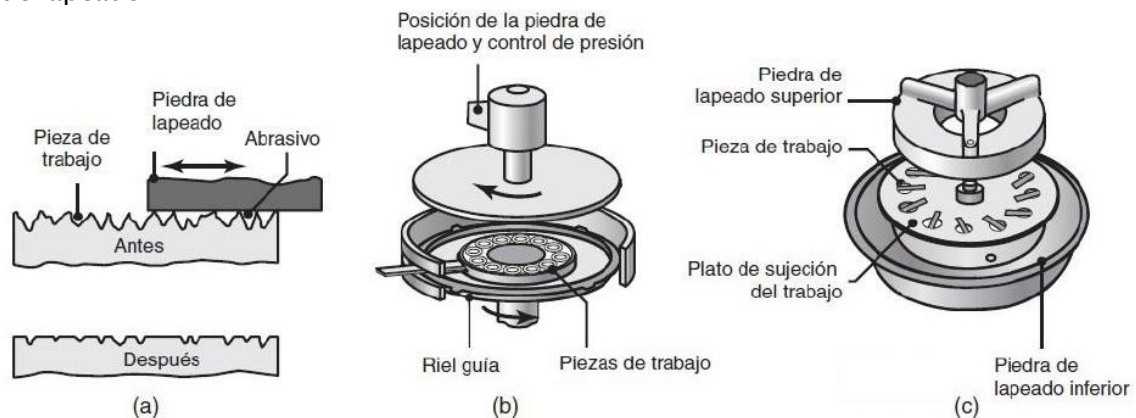


Figura 5.4. a) Esquema del proceso de lapeado, b) Lapeado de producción sobre superficies planas y c) Lapeado de producción sobre superficies cilíndricas [26].

El lapeado plano (Figura 5.4 b) sirve para la obtención de superficies planas y se realiza con dos discos o con uno sólo. En el primer caso, se colocan las piezas planas a mecanizar en una jaula entre dos discos que giran en sentidos opuestos. La jaula transmite un movimiento radial adicional a las piezas para que los discos no dejen estrías anulares en ellas. En el segundo caso, se coloca la pieza sobre un disco giratorio y se mueve con una ligera presión en dirección radial y sentidos alternativos [32].

Las lapeadoras de dos discos también se pueden utilizar para superficies exteriores de piezas cilíndricas (Figura 5.4 c). Las piezas se colocan tangencialmente en la jaula y adquieren, por medio de su movimiento excéntrico, una gran exactitud de forma. Para el lapeado cilíndrico interior se emplean mandriles de expansión, los cuales se introducen junto con el líquido de lapear en el orificio y mediante un movimiento axial y circular, consiguen darle un buen acabado a la superficie interna de orificio [32].

En el lapeado se pueden obtener tolerancias dimensionales de $\pm 0,4 \mu\text{m}$ utilizando abrasivos muy finos con tamaño de grano alrededor de 900 (Tabla 6.3) y el acabado superficial puede ser hasta de 0,025 a 0.1 μm .

MEMORIA

5.3. Pulido

El pulido es un procedimiento que produce un acabado liso y brillante. Se emplea una pasta más o menos cremosa conocida como pulimento, en la cual se encuentran suspendidos los microabrasivos, junto con una esponja de pulir (*pad*). Dependiendo de la agresividad que se quiera en el proceso, hay mucha diversidad entre las durezas de las esponjas y el tamaño de los abrasivos. Se recomienda empezar con una velocidad baja para repartir el producto y después aumentarla realizando movimientos circulares o en zigzag, e ir trabajando pequeñas superficies. Cuando se observa que el pulimento se seca, se detiene el proceso y se limpia, analizando el resultado obtenido. Esto se repite hasta que se consiga el acabado deseado.

Hay varios tipos de pulido, dependiendo del tipo de superficie de la pieza de trabajo. Estos son:

- Pulido químico-mecánico: es de suma importancia en la industria de los semiconductores. Se basa en el principio de una corrosión controlada mediante partículas abrasivas en una solución acuosa.
- Electropulido: mediante el electropulido se pueden obtener acabados de espejo sobre superficies metálicas. Ya que no hay contacto mecánico con la pieza de trabajo, este proceso es ideal para pulir formas irregulares.
- Pulido con campos magnéticos: en esta técnica, las placas de abrasivo se sostienen mediante campos magnéticos y se ayudan de un fluido magnético.

5.4. Abrillantado

El abrillantado es un proceso similar al pulido (de hecho, suelen ir de la mano en muchos acabados) excepto por el uso de abrasivos mucho más finos y discos blandos. El abrasivo también se suministra externamente.

Capítulo 6

6. Rectificado

El rectificado en sí, es un proceso de mecanizado abrasivo el cual emplea un disco con abrasivo aglutinado como herramienta (Figura 6.1). Suele utilizarse en la etapa final de fabricación, tras el torneado o el fresado, para mejorar la tolerancia dimensional y el acabado superficial del producto.



Figura 6.1. Proceso de rectificado y representación de la herramienta de corte [33].

Las diferencias principales entre una herramienta con abrasivos y una herramienta de corte en un solo punto pueden denotarse como sigue:

- Tal y como se comentó previamente, los granos abrasivos se distribuyen aleatoriamente y tienen forma irregular (Figura 6.2).
- El ángulo de ataque entre los granos y la pieza suele ser altamente negativo (unos -60° o incluso menos) por lo que la viruta está sometida a unas deformaciones plásticas mucho mayores que en otros tipos de mecanizado.
- Las posiciones de los granos van variando a lo largo del mecanizado, por lo que no todos los granos están activos en el corte.
- Las velocidades de corte del rectificado son mucho más altas (20–30 m/s por lo general) pudiendo llegar a 150 m/s en un rectificado de alta velocidad [26].

Los parámetros del rectificado se muestran de forma esquemática en la Figura 6.3. Un disco de rectificado de diámetro D retira una capa superficial de material con una profundidad a_e . Un grano individual de la periferia posee una velocidad tangencial V_c mientras que la pieza se mueve con velocidad V_f (velocidad de avance). La longitud de la superficie de contacto entre la pieza y la herramienta durante una pasada es l_c . Además, para un rectificado cilíndrico (Figura 6.3 b), hay otra variable de la velocidad V_w que sería la de rotación de la pieza de trabajo.

MEMORIA

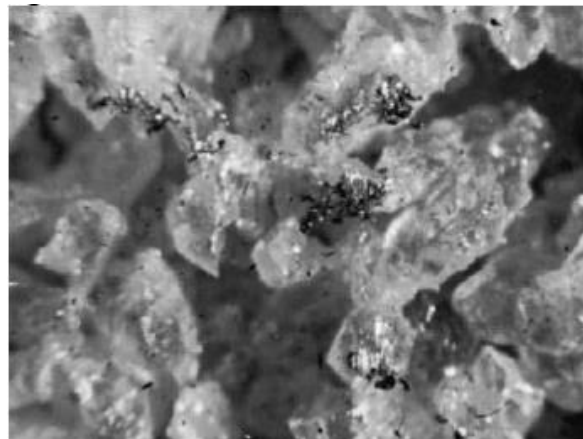


Figura 6.2. Superficie de un disco de rectificado que muestra los granos de abrasivo, la porosidad de la herramienta, el desgaste de los granos y virutas desprendidas de la pieza de trabajo [26].

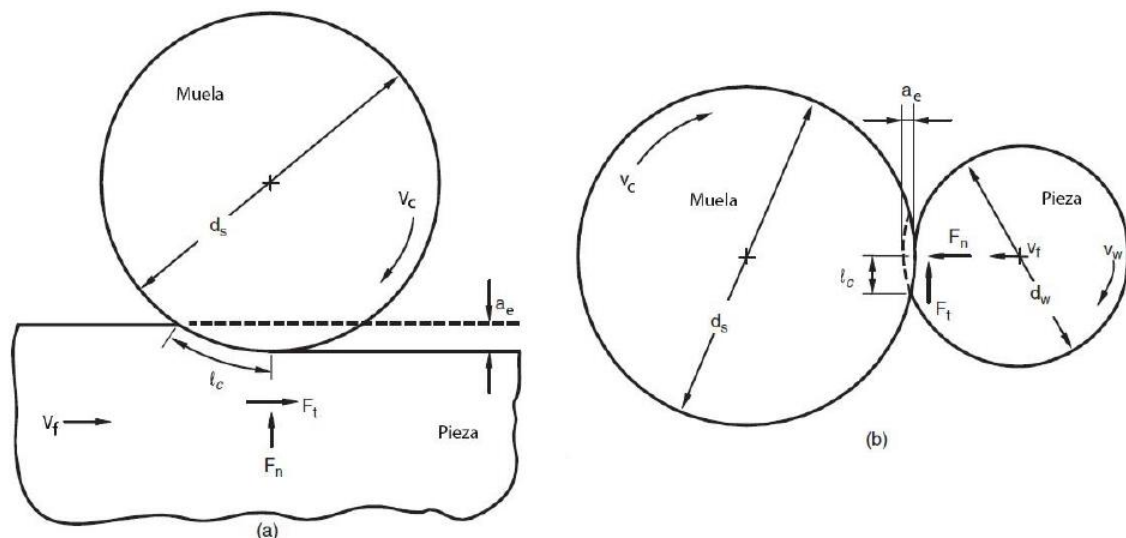


Figura 6.3. Esquema del proceso de rectificado de superficie plana, que muestra diversas variables del proceso. La figura ilustra el rectificado (a) plano y (b) cilíndrico. Adaptada de referencia [34].

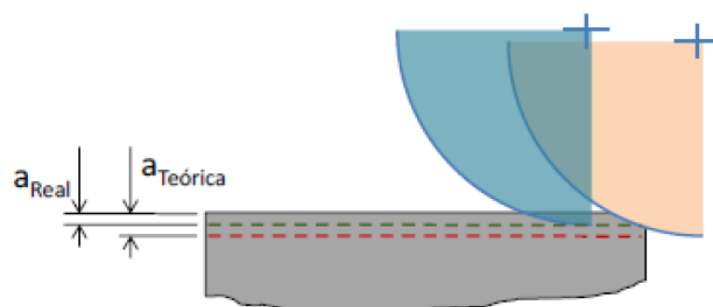


Figura 6.4. Profundidad real VS profundidad teórica [33].

MEMORIA

En cualquier operación de rectificado, la profundidad de pasada efectiva (real) que se alcanza en la pieza no se corresponde con la programada en la máquina (teórica) (ver Figura 6.4). Esto sucede por la aparición de grandes fuerzas normales y de rozamiento que generan:

- Deformaciones elásticas de la máquina
- Efectos térmicos sobre pieza, disco y máquina
- Desgaste del disco

La relación entre la profundidad real y la teórica viene dada por la (6.1):

$$a_e = a - d - a_{sw} + a_t \quad (6.1)$$

donde a es la profundidad fijada en máquina, d es la deformación elástica, a_{sw} es el desgaste del disco en cada pasada y a_t es la expansión térmica de disco y pieza [35].

Por ello se emplea el término de apagado de chispa, que se refiere al tiempo invertido en pasadas sucesivas del disco sobre la misma superficie hasta que se relajan las deformaciones y se alcanza la profundidad de pasada programada por la máquina.

Dentro del proceso de rectificado intervienen muchos factores relacionados con la rectificadora (precisión, cinemática, rigidez, estabilidad térmica, etc), el disco (tipo y tamaño de abrasivo, aglomerante y dureza, estructura, velocidad de rotación, propiedades térmicas y químicas, etc), la pieza (geometría, propiedades mecánicas, propiedades térmicas, velocidad de avance, etc), fluido de corte (caudal, presión, conductividad térmica, capacidad lubricante, etc) ... En sucesivos apartados, se presenta cómo afecta la variación de alguno de estos factores al proceso y de su intervención en las características de la pieza final.

6.1. Formación de viruta

En el rectificado de metales, se ha dado por hecho que el arranque de material se produce por un fenómeno de cizalladura, similar al que puede verse en otros procesos de mecanizado como el fresado o el torneado. Gracias al avance tecnológico, a día de hoy se puede ver esta similitud de forma mucho más clara. En la Figura 6.5 se pueden observar varios ejemplos de virutas de rectificado mediante un microscopio electrónico

MEMORIA

de barrido (SEM³). Mayormente, se aprecian virutas con forma de rizo, muy parecidas a las que se producen en el fresado o torneado, pero de alguna forma irregulares en tamaño y forma debido a la irregularidad de los granos abrasivos. Estas virutas, están formadas por una fina lámina de material, similar a otros procesos de mecanizado, provocada por la inestabilidad térmica del proceso, por la cual la resistencia de cizalladura del material disminuye debido al calentamiento localizado causado por una intensa deformación plástica [34]. Relacionado con el aumento de temperatura, se pueden producir chispas durante el rectificado, que no son más que la viruta incandescente debido a la reacción exotérmica de éstas con el oxígeno presente en la atmósfera. Obviamente, las chispas no aparecen si el rectificado se lleva a cabo en un ambiente libre de oxígeno.

Otros dos tipos de partículas encontradas entre las virutas del rectificado son viruta corta y compacta y esferas (Figura 6.5 a). La formación de viruta compacta puede ocurrir por los altos ángulos de ataque negativos de los granos del disco. Esto provoca básicamente una compresión plástica y un abultamiento justo delante del filo de corte junto con la cizalladura típica de la formación de la viruta.

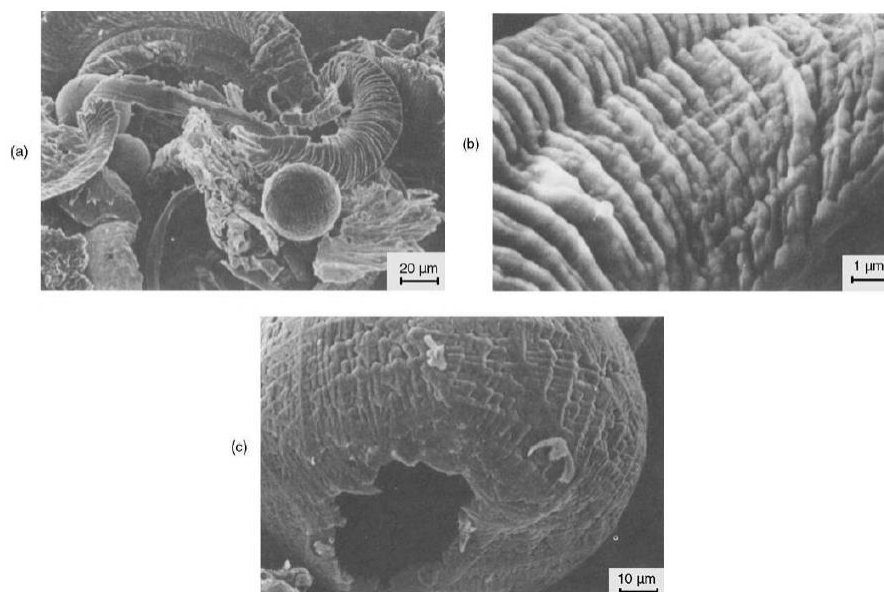


Figura 6.5. Imágenes SEM de virutas de mecanizado de una pieza de acero UNS G10650 [34].

Un ejemplo de viruta esférica puede apreciarse en la Figura 6.5 c. Su estructura parece indicar que se ha fundido y luego solidificado [34]. La forma redonda y el hueco interior

³ Por sus siglas en inglés *Scanning Electron Microscope*, es una técnica de microscopía electrónica capaz de producir imágenes de alta resolución de la superficie de una muestra utilizando las interacciones electrón-materia.

MEMORIA

son consecuencias de la fundición y de las tensiones que se producen en la superficie de la pieza y que actúan sobre la viruta fundida.

6.2. Fuerzas de rectificado

Debido a la acción del rectificado, aparecen unas fuerzas en la zona de contacto entre la pieza y el disco. En las operaciones comunes de rectificado, el vector de la fuerza resultante puede separarse en dos componentes: una tangencial (F_t) y otra normal (F_n). Para rectificados poco profundos, la fuerza tangencial es prácticamente horizontal (paralela a la dirección de avance) mientras que la componente normal es casi vertical (perpendicular a la misma) tal y como se muestra en la Figura 6.3. Sin embargo, esto no puede aplicarse en casos donde la profundidad de corte sea mayor, como el caso del rectificado *Creep-feed grinding*⁴, ya que la línea de acción de la fuerza puede darse en un mayor número de direcciones debido a que la superficie de contacto es mayor.

Es importante conocer las fuerzas que se producen durante el rectificado porque aporta información sobre:

- El cálculo del requerimiento de potencia
- Diseño de maquinaria, soportes y sujeciones de la pieza
- Deflexión en la pieza y la rectificadora que pueden acarrear errores en la precisión dimensional

En una primera aproximación, se puede afirmar que la fuerza tangencial (fuerza de cada grano sobre la pieza) es proporcional a la resistencia del material [26]. Normalmente, las fuerzas en el rectificado son menores que en otros procesos de mecanizado, debido a las pequeñas dimensiones que se manejan. Estas fuerzas deben mantenerse bajas para evitar distorsiones y mantener las tolerancias de las piezas de trabajo.

La potencia asociada a las componentes de la fuerza mostradas en la Figura 6.3 se puede expresar como

$$P = F_t(V_c \pm V_f) \quad (6.2)$$

El signo positivo se emplea cuando las velocidades tienen sentidos opuestos y el negativo, cuando ambas van en la misma dirección [34]. Como normalmente V_f suele ser

⁴ Procedimiento a alta profundidad de pasada y baja velocidad de trabajo. Fundamentalmente, se lleva a cabo con discos de superabrasivo, mostrando excelente comportamiento frente al desgaste [36] (ver apartado 8.10.4).

MEMORIA

mucho menor que la velocidad de la herramienta, la expresión (6.2) se puede simplificar a

$$P = F_t V_c \quad (6.3)$$

Para la mayoría de las situaciones dentro del rectificado, la expresión (6.3) suele ser suficiente para caracterizar la potencia ya que términos adicionales como la velocidad transversal suelen ser despreciables.

6.3. Energía específica

Un parámetro fundamental derivado de la potencia empleada y las condiciones de mecanizado es la energía específica, que se define como la energía por unidad de volumen de material retirado (6.4):

$$u = \frac{P}{Q_w} \quad (6.4)$$

Donde el numerador es la potencia (6.3) y el denominador es el ratio volumétrico de material eliminado en función de los parámetros de rectificado mostrados en la Figura 6.3 que se define como

$$Q_w = V_f \cdot a_e \cdot b = \pi \cdot d_w \cdot V_f \cdot b \quad (6.5)$$

donde b es el ancho del rectificado.

Este término sirve para determinar las siguientes acciones:

- Formación de la viruta, pliegues y surcos al paso del disco por la superficie de trabajo (Figura 6.6)
- Estimación de los requerimientos de potencia de la máquina rectificadora
- La fricción y la consecuente formación de la cara de desgaste causada por el rozamiento del grano a lo largo de la superficie de la pieza de trabajo. La cara de desgaste roza continuamente a lo largo de la superficie rectificada, disipa energía (debido a la fricción) y hace que la operación de rectificado sea menos eficaz (ver Figura 6.12)

Los niveles de energía específica para las operaciones de rectificado son mucho mayores que los de otras operaciones de mecanizado (ver la comparativa de la Tabla 6.1). Esta diferencia se atribuye a la presencia de caras de desgaste (filos planos), altos ángulos

MEMORIA

de ataque negativos de los granos (que requieren más energía) y al efecto del tamaño de grano (cuanto más pequeña sea la viruta, más energía se necesitará para crearla). Para disminuir los altos valores de energía específica del rectificado, es importante tener una buena lubricación.

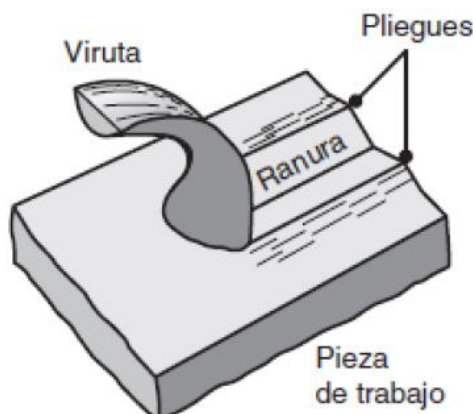


Figura 6.6. Formación de la viruta y surcos de la superficie de trabajo debido al paso de un grano abrasivo [26]

Tabla 6.1. Comparación de energías específicas entre operaciones de corte convencionales y rectificado (adaptada de referencia [26])

Material	Energía específica [W·s/mm ³]	
	Operaciones de corte	Rectificado
Aluminio	0,4-1	7-27
Hierro fundido	1,1-5,4	12-60
Aleaciones de Titanio	2-5	16-55
Aceros para herramientas (T15)	2-9	18-82

6.4. Temperatura

El aumento excesivo de temperatura no es deseado dentro de un proceso de rectificado ya que puede:

- Afectar negativamente a las propiedades superficiales de la pieza
- Provocar la aparición de tensiones residuales en la pieza de trabajo
- Los gradientes de temperatura provocan distorsiones debido a las diversas contracciones y dilataciones que sufre la pieza, lo que dificulta el control de las tolerancias.

MEMORIA

El aumento de temperatura es directamente proporcional al aumento de la profundidad de corte y del diámetro y profundidad del disco y disminuye al incrementarse la velocidad de la pieza de trabajo [26].

Durante el rectificado, se pueden llegar a alcanzar temperaturas de hasta 1600 °C. La mayor parte de este calor producido se lo lleva la viruta (que incluso puede llegar a fundirse), lo que permite que las piezas sean rectificadas con suficiente precisión dimensional. Debido a las altas temperaturas, es esencial que los procesos de rectificado tengan una buena refrigeración para que las propiedades de la pieza sean las deseadas.

Algunos efectos, catalogables como adversos, que experimenta el material al ser rectificado como consecuencia de las altas temperaturas alcanzables en este proceso de mecanizado abrasivo, son descritos en los siguientes subapartados.

6.4.1. Revenido

Un excesivo aumento de temperatura puede provocar el revenido de la superficie de la pieza de trabajo. Deben seleccionarse cuidadosamente las variables del proceso con el fin de evitar la aparición de este fenómeno; una buena refrigeración puede ser la solución, aunque también intervienen otras variables como la velocidad, profundidad de corte, etc.

6.4.2. Quemado

La temperatura excesiva puede quemar la superficie que se rectifica. Se puede detectar mediante técnicas de ataque y metalúrgicas. Puede llegar a producir transformación de fase en las capas de la superficie. Esto afecta de manera adversa a las propiedades superficiales de las partes rectificadas, reduciendo la ductilidad y tenacidad de la superficie.

6.4.3. Agrietamiento por calor

Como consecuencia de las altas temperaturas en el rectificado, se pueden producir una serie de grietas en la superficie de la pieza con dirección perpendicular a la del rectificado. En los casos más graves, también pueden aparecer grietas paralelas. Como era de esperar, una superficie afectada por el calor carece de tenacidad y tiene baja resistencia a la fatiga y corrosión.

MEMORIA

6.4.4. Tensiones residuales

Un proceso de rectificado conlleva irremediablemente la aparición de tensiones residuales cerca de la superficie de la pieza, que pueden afectar significativamente al comportamiento mecánico del material. Uno de los desencadenantes principales de la aparición de tensiones residuales en la pieza de trabajo son los gradientes de temperatura en su interior. Esto en cierta manera induce una deformación plástica cerca de la superficie debido a un esfuerzo de compresión originado en la interacción de los granos de abrasivo con la pieza.

En la zona de rectificado, la expansión térmica del material más caliente perteneciente a la superficie se ve en parte limitada por el material más frío de capas más profundas de material. Esto genera tensiones de compresión que, si son suficientemente grandes, pueden provocar deformaciones plásticas del material. Posteriormente, cuando el calor del rectificado va disminuyendo, el material deformado tiende a ser disminuir su tamaño con respecto a las subcapas del material, por lo que el requerimiento de continuidad causa la aparición de tensiones residuales a tracción, los cuales suelen ser mucho mayores en magnitud que los de compresión. La formación de tensiones residuales puede ser más perjudicial si se combina con alguna transformación de fase del material [34]. La influencia de las tensiones residuales es mayor conforme más frágil es el material ya que las consideraciones sobre la tensión son más críticas. Condiciones de rectificado más severas causan, como era de esperar, tensiones residuales de mayor valor, lo que conlleva una reducción de la resistencia a fatiga y la aparición de grietas.

Debido al efecto adverso que las tensiones residuales tienen sobre la resistencia a la fatiga, las variables del proceso deben seleccionarse con cuidado. Los fluidos de rectificado (así como su aplicación), la profundidad de corte y las velocidades, afectan a la magnitud y tipo de tensiones residuales desarrolladas. Por lo general, los esfuerzos residuales se pueden reducir disminuyendo la velocidad del disco y aumentando la de la pieza de trabajo. También pueden utilizarse discos de rectificado más blandos.

Algunos ejemplos de la distribución de tensiones residuales sobre la superficie de la pieza de trabajo pueden verse en la Figura 6.7. Las medidas de tensiones residuales, que actualmente se realizan con Rayos-X, revelan normalmente que las producidas en la dirección del rectificado son las mismas que las desarrolladas en la dirección perpendicular. También se observa que las tensiones se concentran cerca de la superficie de rectificado para luego disminuir conforme la profundidad es mayor. En la mayoría de los casos, las tensiones residuales suelen ser a tracción, lo que indica que su origen es térmico. Las tensiones residuales de compresión son consideradas como

MEMORIA

beneficiosas para las propiedades mecánicas del material, mientras que las de tracción son perjudiciales.

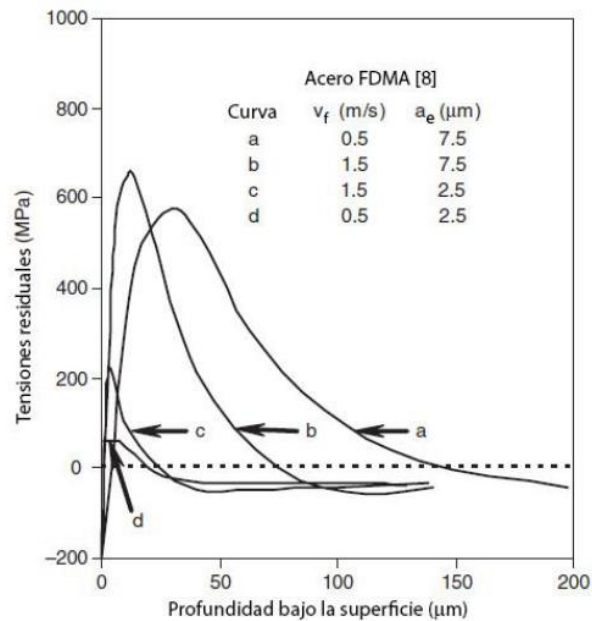


Figura 6.7. Distribuciones de tensiones residuales tras el rectificado de la aleación de acero FDMA [37] (adaptada de referencia [34])

6.5. Discos de rectificado

Debido a que, de forma general, cada grano de abrasivo retira sólo una pequeña cantidad de material en cada pasad, es necesaria la presencia de muchos de ellos actuando a la vez y a gran velocidad. Esto se consigue empleando abrasivos aglutinados, por lo general en herramientas con forma de disco, en la que los granos se distribuyen de manera aleatoria.

Como es posible apreciar en la Figura 6.8, el abrasivo se mantiene unido mediante un material aglomerante. La porosidad (hueco libre entre el grano y el aglomerante) es esencial para proporcionar holgura a las virutas y ayudar con el enfriamiento.

Hoy en día es posible elegir entre una amplia variedad de tipos y tamaños de piedras abrasivas. En la Figura 6.9 se aprecian algunos de los ejemplos más utilizados. Estos discos pueden incluir superabrasivos como el diamante o el nitruro de boro cúbico (ver apartado 6.9.1), pero debido a su elevado coste, se emplean sólo en ocasiones de máxima exigencia en la calidad superficial.

MEMORIA

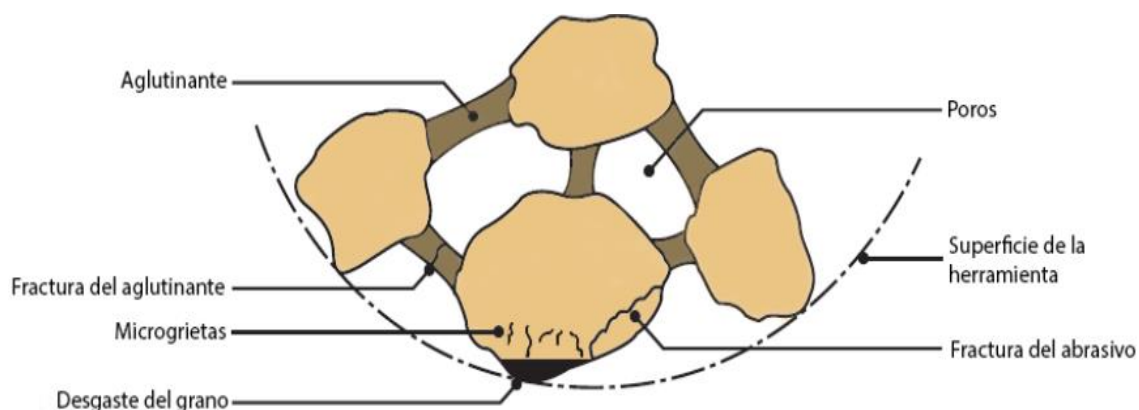


Figura 6.8. Representación esquemática de una herramienta de corte que muestra su estructura, desgaste y fractura (adaptada de referencia [26]).

La denominación de estos discos está normalizada con un sistema estandarizado de letras y números que indican el tipo de abrasivo, tamaño de grano, grado, estructura y tipo de aglomerante. En la Figura 6.10 se muestra el sistema para discos con abrasivo convencional aglutinado y en la Figura 6.11 para superabrasivos.

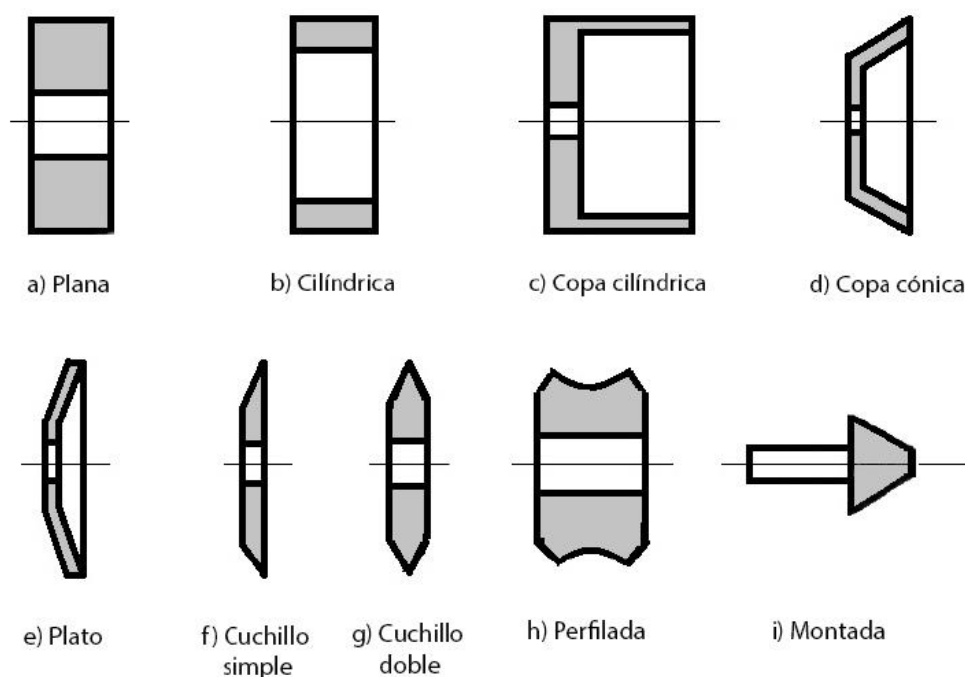


Figura 6.9. Esquemas de tipos de discos de rectificado más comunes. El color grisáceo de las imágenes representa la zona abrasiva de la herramienta.

MEMORIA

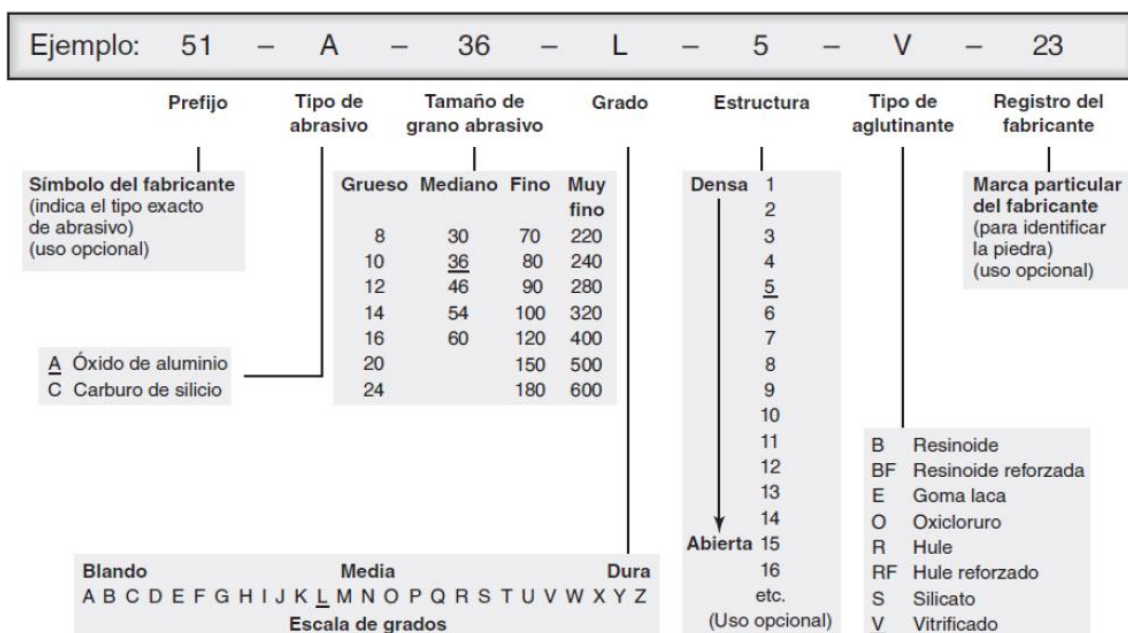


Figura 6.10. Sistema estándar para la denominación de discos de abrasivo convencional [26] [34].

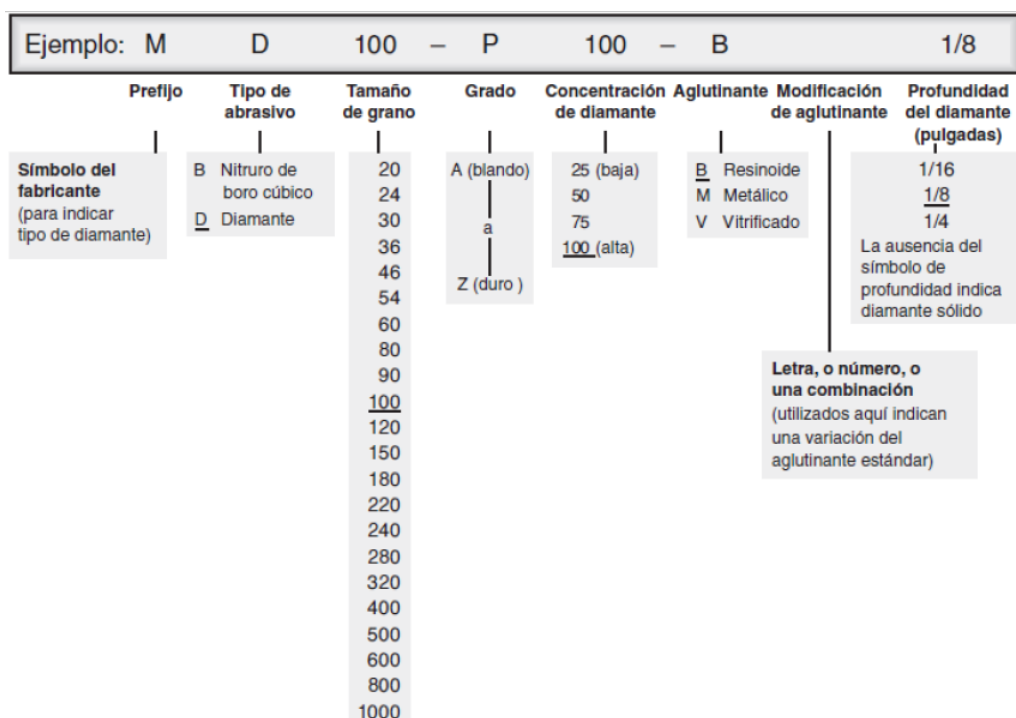


Figura 6.11. Sistema estándar para la denominación de discos de superabrasivo [26] [34].

MEMORIA

6.5.1. Abrasivos

Los abrasivos más comúnmente empleados en las operaciones de rectificado son [33]:

- Abrasivos convencionales
 - Óxido de aluminio (Al_2O_3): se aplica generalmente al rectificado de aceros sin grandes exigencias.
 - Carburo de silicio (SiC): apto para el rectificado de carburos, cerámicas, metales no férricos, fundiciones... No está tan extendido como el anterior.
- Superabrasivos
 - Nitruro de boro cúbico (CBN): se emplea para el rectificado a alta velocidad de férricos de alta dureza. También se puede utilizar para aleaciones termorresistentes.
 - Diamante: se usa para el rectificado a alta velocidad y precisión de cerámicas y metal duro.

Obviamente, estos abrasivos han de ser más duros que la pieza a la temperatura de contacto. Además de la dureza, una propiedad que los caracteriza es su friabilidad, es decir, la capacidad para romperse en piezas más pequeñas. Esto le confiere al abrasivo la capacidad de “autoafilarse”, lo que le permite mantener el filo durante el uso. Una alta friabilidad lleva implícito una baja resistencia a la fractura. Por lo tanto, cuanto más friable sea un abrasivo, más rápidamente se fragmenta ante las fuerzas producidas durante el rectificado. En la tabla siguiente se muestran algunos ejemplos de abrasivos convencionales.

Tabla 6.2. Intervalos de dureza Knoop para diversos materiales y abrasivos [35].

Abrasivo	Dureza (Knoop)	Tenacidad relativa	Aplicaciones
Al_2O_3 rubí	2260	1,55	HSS y aceros de alta aleación
Al_2O_3 blanca	2120	1,75	Rectificado de precisión de materiales férricos
Al_2O_3 marrón	2040	2,80	Propósito general, materiales férricos
SiC verde	2840	1,60	Rectificado de precisión de carburos y cerámicas
SiC negro	2680	1,75	Fundición de hierro, cerámica, metales no férricos dúctiles

MEMORIA

Para la selección del material de la herramienta de corte, la afinidad de un grano abrasivo con el material de la pieza es un factor a tener en cuenta ya que, cuanto menor sea la reactividad entre los dos materiales, menor será el desgaste de la herramienta y desafilado de los granos de corte [26].

El tamaño de grano abrasivo está relacionado con el acabado superficial y con la precisión. De forma general, un tamaño de grano grande se utiliza para desbaste, consiguiendo un acabado superficial “pobre”. Sin embargo, con un tamaño de grano pequeño se consiguen buenos acabados y precisión. Este tamaño se identifica por el número de grano; cuanto más pequeño es el tamaño del grano, más grande será el número que lo identifica. Por ejemplo, el número 10 se considera muy grueso y el 100 muy fino (Tabla 6.3 columna derecha).

Tabla 6.3. Ejemplos de tamaños de grano de los discos [35]

FEPA⁵ (dimensión del grano μm)	ANSI⁶ (Nº de hilos de la malla)
1182	16 – 20
852	20 – 30
602	30 – 40
502	35 – 45
427	40 – 50
252	60 – 80

Para darle compactación a estos abrasivos, se emplea un material aglomerante o aglutinante el cual también está normalizado y forma parte de la denominación de los discos (Figura 6.10 y Figura 6.11).

6.5.2. Aglomerantes

El aglomerante es el material de unión de los granos de abrasivo durante el mecanizado. Se encarga de evitar pérdidas prematuras de grano, permitir liberar granos desafilados, transmitir las fuerzas del husillo a la zona del rectificado y disipar el calor generado en el proceso. A continuación, se describen los tipos más comunes de aglomerantes:

- **Vitrificados o vítreos [V]**

Es el material de unión más común (se lleva alrededor de un 50% del mercado convencional), sobre todo por el gran crecimiento en discos CBN [35]. Se compone

⁵ FEPA: Federation of European Producers of Abrasives

⁶ ANSI: Instituto Nacional Estadounidense de Estándares (*American National Standards Institute*)

MEMORIA

básicamente de feldespato y arcillas. Junto con el abrasivo, se someten a grandes presiones y temperaturas, a fin de que el vidrio genere resistencia estructural.

Los discos con aglomerante vítreo son resistentes, con porosidad controlable y a prueba de aceites, ácidos y agua, permiten obtener un rectificado de precisión y se pueden obtener velocidades de hasta 40 m/s [35]. Sin embargo, son quebradizos y carecen de resistencia frente a choques mecánicos y térmicos. Para mejorar este aspecto, se les puede añadir un refuerzo de acero para mejorar el soporte estructural del abrasivo aglutinado. El color del disco se puede modificar durante su fabricación, de forma que permite crear un código de colores y asociarlo a un grupo de materiales específicos (ferrosos, cerámicos, etc).

- **Resinosos [B]**

Los materiales aglomerantes resinosos son básicamente resinas termoestables. La fabricación de estos discos consiste fundamentalmente en la mezcla del material abrasivo con la resina, prensar dicha mezcla y curarlo a una temperatura de unos 175 °C aproximadamente [26].

Tienen un arranque suave y menor porosidad que las vitrificadas. Debido a que la rigidez de las resinas es menor que la del vidrio, estos discos de rectificado son más flexibles, pero no soportan altas temperaturas de trabajo ni fluidos alcalinos. Recientemente, se ha desarrollado el uso de poliamida, la cual es más tenaz y resistente a las altas temperaturas.

- **Metálicos [M]**

Los granos de abrasivo (por lo general diamante o CBN), se aglutinan en la periferia de un disco metálico. Esta unión se realiza a altas presiones y temperaturas. El disco en sí puede ser de aluminio, bronce, acero, cerámico o de material compuesto, dependiendo de las características deseadas. La retención de los granos de superabrasivo es elevada por lo que el disco sufre poco desgaste. No son herramientas porosas.

Tabla 6.4. Propiedades generales de los grupos de aglomerantes [35].

	Resinoso	Vítreo	Metálico
<i>Dureza (HB)</i>	228	380	278
<i>Resistencia a la rotura (N/mm²)</i>	7,3	8,6	14,4
<i>Módulo de Elasticidad (N/mm²)</i>	1200	4200	5570

MEMORIA

6.5.3. Mecanismos de desgaste

El desgaste de los discos de rectificado es un factor a considerar ya que provoca, a escala microgeométrica, la pérdida de capacidad abrasiva y, a nivel macrogeométrico, la pérdida de forma. Esto puede derivar a aumentos de la potencia consumida, del daño térmico en la pieza (quemados), variaciones en el perfil de rugosidad y/o pérdida de tolerancias dimensionales en la pieza. El desgaste de estos discos proviene básicamente de cuatro mecanismos: pérdida de filo de grano, fractura/rotura de grano, rotura de aglomerante (pérdida de granos enteros) y embotamiento del disco (ver Figura 6.12).

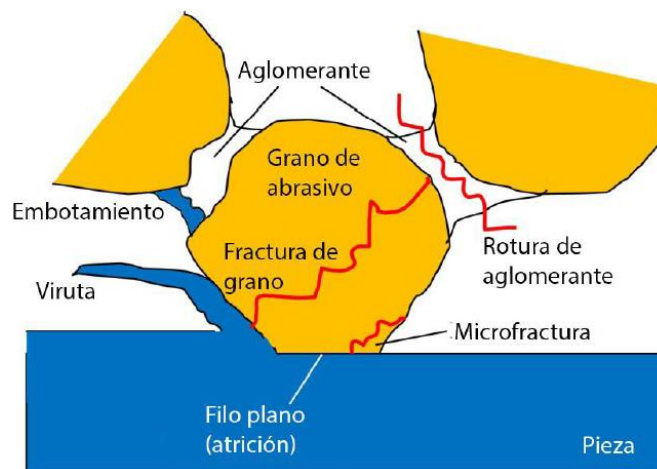


Figura 6.12. Mecanismos de desgastes en los discos de rectificado

- **Pérdida de filo de grano**

En este tipo de desgaste, también conocido como atrición, las aristas de corte de un grano originalmente puntiagudo se desafilan y desarrollan una cara de desgaste (Figura 6.13). Este desgaste está provocado por reacciones físico-químicas entre la herramienta y la pieza que incluyen difusión, degradación química o descomposición del grano, microfracturas, deformación plástica y fusión.

Este desgaste se da en menor medida cuando los dos materiales son, de forma recíproca, químicamente inertes. Esto es, cuanto más inertes, menor tendencia habrá a la reacción y adhesión entre el grano y la pieza. Por ejemplo, el óxido de aluminio o el CBN son ideales para rectificar aceros, ya que son inertes respecto del hierro. Lo contrario ocurre con el carburo de silicio, el cual puede disolverse.

Por lo tanto, para evitar este fenómeno, es importante tener en cuenta la reactividad del grano con la pieza de trabajo y las propiedades mecánicas relativas, como la

MEMORIA

dureza o la tenacidad. El ambiente y el tipo de fluido que se utilicen durante el proceso también influyen en las interacciones grano–pieza.

- **Fractura/rotura de grano**

Aunque a simple vista pueda parecer un inconveniente, la fragilidad de los granos de abrasivo se aprovecha para evitar altas temperaturas en la cara de desgaste de estos, ya que el proceso de rectificado sería ineficaz y costoso. Lo ideal es que el grano se fracture a una velocidad moderada, de manera que se produzcan continuamente nuevas aristas afiladas de corte (microfractura de granos, Figura 6.12).

La selección del tamaño y tipo de grano también depende de la velocidad de desgaste por rozamiento del grano (atrición). Es decir, si la pérdida de filo del grano es alta y la friabilidad es baja, podrían aparecer caras de desgaste bastante grandes. De esta forma se tiene un proceso ineficaz y pueden llegar hasta aparecer quemados en la superficie de la pieza.

- **Fractura del aglomerante**

En este caso se presentan dos situaciones: si el aglomerante es demasiado fuerte, los granos desafilados no pueden abandonar la herramienta. Esto evita que los granos más afilados puedan entrar en contacto con la pieza, teniendo un proceso menos eficaz. Por otro lado, si el aglutinante es demasiado blando, los granos se sueltan con facilidad y aumenta la velocidad de desgaste del disco. En este caso, el mantener la precisión dimensional se vuelve más complicado.

De forma general, se recomienda emplear aglomerantes más blandos en los materiales más duros, ya que permiten reducir los esfuerzos residuales y el daño térmico en la pieza de trabajo. Las herramientas más duras, se suelen utilizar en materiales más blandos para poder retirar grandes cantidades de material a altas velocidades.

- **Embotamiento del disco**

El disco está embotado cuando los poros están obstruidos por material de la pieza de trabajo. Esto conduce a trabajar con una herramienta sobrecargada, causando mayor desgaste y daño térmico sobre la pieza. Este fenómeno puede evitarse con una buena aplicación del fluido de trabajo, el cual se encarga de ir limpiando la superficie de contacto entre el disco y la pieza (Figura 6.13).

MEMORIA

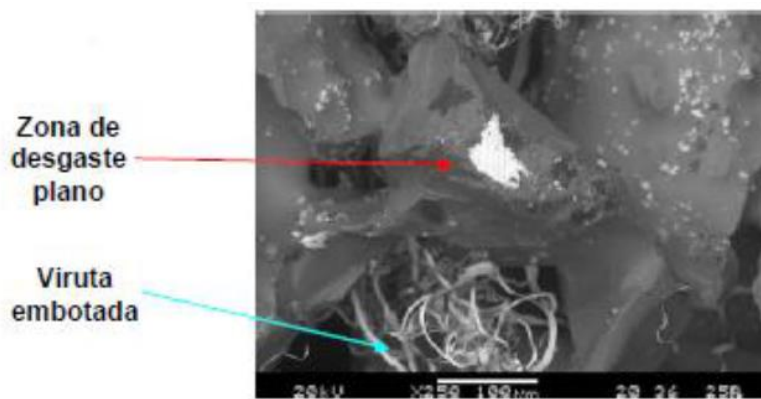


Figura 6.13. Imagen SEM de una disco de rectificado donde se aprecia desgaste por atrición y por embotamiento

El desgaste de los discos de rectificado se relaciona con la cantidad de material retirado de la pieza de trabajo mediante un parámetro conocido como relación de rectificado (G , del inglés *Grinding ratio*), que se define como:

$$G = \frac{\text{Volumen del material retirado}}{\text{Volumen de desgaste de la muela}} \quad (6.6)$$

En la práctica, no siempre es deseable obtener una relación alta de rectificado, ya que esto puede indicar la presencia de granos desafilados y, por lo tanto, posible daño en la superficie de trabajo. En la Figura 6.30 se observa como el desgaste va aumentando conforme trabaja el disco, habiendo una zona aproximadamente lineal donde se puede aplicar la relación de rectificado anteriormente descrita.

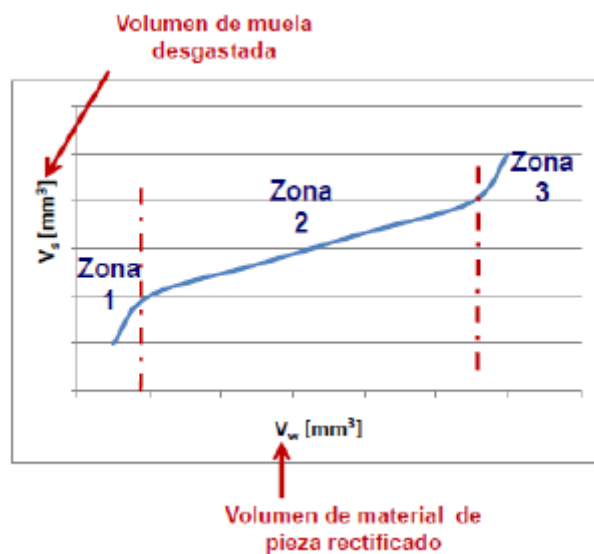


Figura 6.14. Relación de rectificado como parámetro de medida del desgaste [33]

MEMORIA

6.5.4. Diamantado de discos

Este proceso se basa en la recuperación de la capacidad abrasiva de los discos mediante la microrrotura de granos para crear nuevos filos y la eliminación del material embotado. Mediante este proceso, también se recupera la redondez y la geometría del disco. Las técnicas más empleadas para afilar discos de rectificado son:

- Hacer pasar una herramienta mono o multipunta de diamante a lo largo de la cara de rectificado de la herramienta y retirar con cada pasada una pequeña porción de la superficie del disco. También se puede utilizar una herramienta rotatoria de diamante.
- Prensado manual con discos de acero con punta en estrella contra los discos de rectificado. El material se retira de la superficie de la herramienta triturando los granos. El resultado es una superficie áspera que se utiliza solo en operaciones de desbaste.
- Se emplean también barras abrasivas de carburo de silicio (SiC) de aplicación manual sobre todo en discos más blandos. Esta técnica no es apropiada para rectificadores de precisión (Figura 6.15).

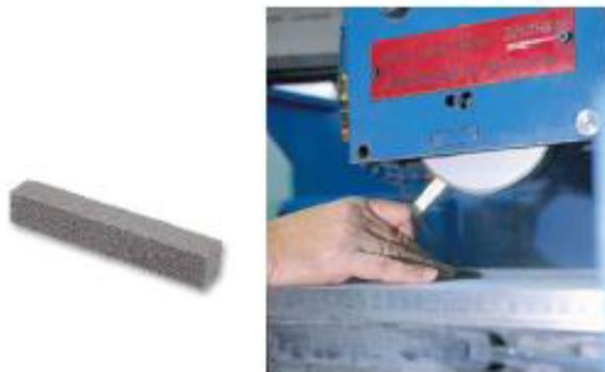


Figura 6.15. Barras abrasivas de SiC de aplicación manual

- Hay también un tipo de afilado basado en el mismo principio que el mecanizado por electroerosión. Este proceso se emplea sobre aglutinantes metálicos, desgastando capas muy delgadas con lo que quedan expuestas nuevas aristas de corte.

La frecuencia y la técnica de acondicionamiento de disco empleada son factores importantes en relación a la calidad, ya que afectan directamente a las fuerzas durante el rectificado y al acabado superficial de la pieza. En las rectificadoras actuales se ha conseguido un afilado automático y monitorizado en todo momento, de forma que el disco se afila de manera continua conforme avanza el proceso.

MEMORIA

Actualmente, se puede llegar a conseguir una resolución de afilado tan baja como de $0,25 \mu\text{m}$ a $1 \mu\text{m}$ (dependiendo del tipo de disco a acondicionar). Si se desea un diamantado fino para producir una alta densidad de grano, se requiere un trabajo más preciso, por lo que se requiere un avance pequeño ($0,05 \text{ mm/rev}$) y una profundidad igualmente baja ($5 \mu\text{m}$). Si lo que se quiere es un diamantado basto para producir una baja densidad de grano, habría que aumentar la velocidad de avance ($0,25 \text{ mm/rev}$) y la profundidad de corte ($25 \mu\text{m}$). La única condición que debe cumplirse en el diamantado sería (ver Figura 6.16) [35]:

$$\frac{f_d}{b_d} < 1$$

Con esto se asegura que se diamanten todos los granos de la herramienta.

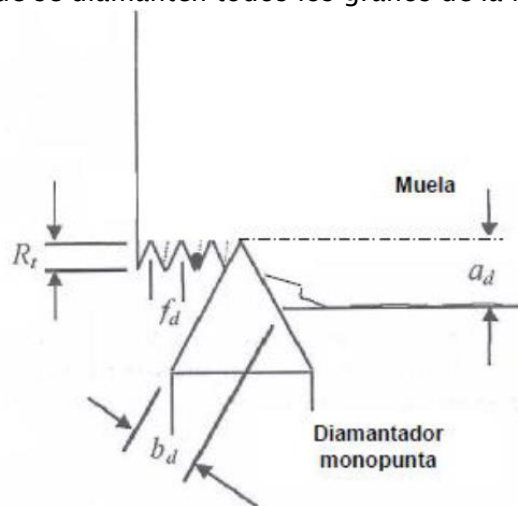


Figura 6.16. Parámetros de diamantado [35]

6.6. Tipos de rectificado

La selección de la operación de rectificado para una aplicación en particular depende de la forma y las peculiaridades de la pieza de trabajo, tamaño, facilidad de sujeción y capacidad de producción requeridos (Tabla 6.5). En esta sección se describen los tipos básicos de operaciones de rectificado.

El movimiento relativo del disco puede ser a lo largo de la superficie de la pieza de trabajo (transversal) o se puede mover radialmente hacia la pieza (penetración). Los procedimientos de rectificado se diferencian entre sí por las distintas clases de los movimientos de avance y aproximación, mientras que el movimiento de corte lo realiza siempre la herramienta. Las rectificadoras planas son las más comunes en la industria, seguida de las cilíndricas; las menos comunes son las de interiores.

MEMORIA

Tabla 6.5. Características generales de los procesos y máquinas para el rectificado [26]

Proceso	Características	Dimensiones máximas características, longitud y diámetros (m)
Plano	Superficies planas de la mayoría de los materiales. La capacidad de producción depende del tamaño de la mesa y el nivel de automatización (es alta si la mesa es de mesa rotatoria con husillo vertical).	Mesa alternativa: L=6 Mesa rotatoria: D=3
Cilíndrico	Piezas de trabajo redondas con diámetros escalonados. Baja capacidad de producción (a menos que se automatice).	Pieza de trabajo: D=0,8 Rectificadoras universales: D=2,5
Sin centros	Piezas de trabajo redondas y esbeltas. Alta capacidad de producción.	Pieza de trabajo: D=0,8
Interiores	Orificios en la pieza de trabajo. Baja capacidad de producción.	Orificio: D=2

6.6.1. Rectificado plano

Es el tipo de rectificado más común y, de forma general, se utiliza para obtener superficies planas o perfiles (ver Figura 6.17). En el rectificado periférico (o de penetración) la herramienta giratoria realiza el corte con su superficie periférica y en el rectificado lateral, con una de sus superficies laterales. En el rectificado longitudinal, la dirección principal de avance es la paralela a la dirección del mecanizado mientras que, para el rectificado giratorio, existen configuraciones de husillos verticales y mesas rotatorias (conocidas como tipo Blanchard, Figura 6.17 d)).

Los parámetros para este tipo de rectificado son (ver Figura 6.18): profundidad de pasada (a_e), velocidad del disco (V_c), velocidad de avance (V_f) y ancho de pasada (b).

MEMORIA

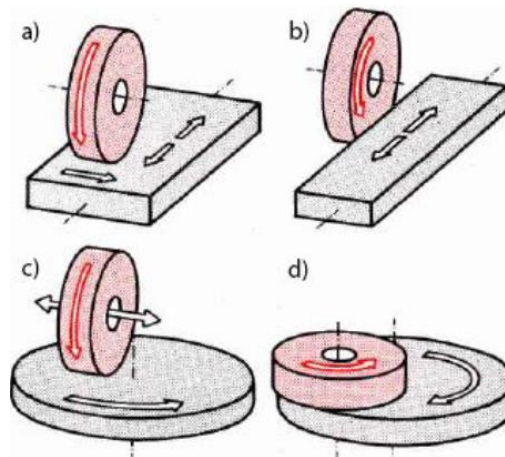


Figura 6.17. Variantes del rectificado plano: a) Longitudinal periférico, b) longitudinal lateral, c) Giratorio periférico y d) Giratorio lateral [32]

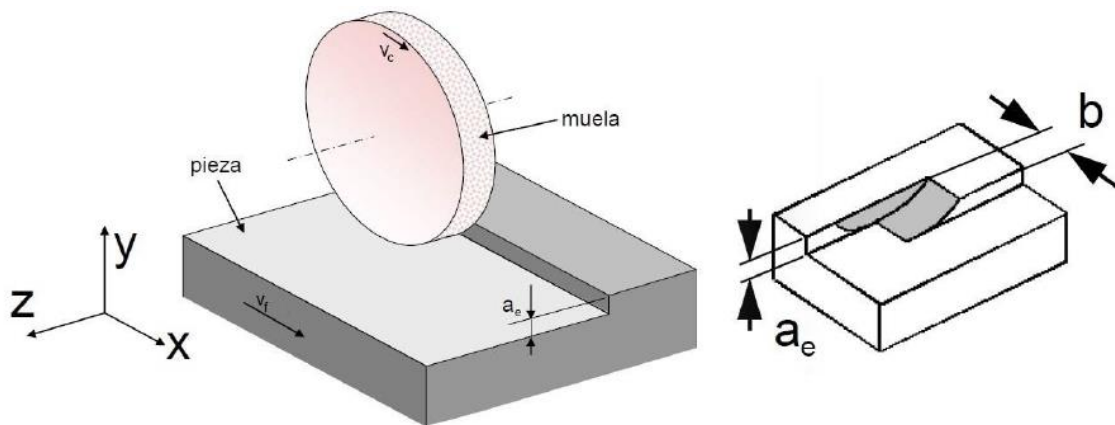


Figura 6.18. Parámetros del rectificado plano [33]

6.6.2. Rectificado cilíndrico

El rectificado cilíndrico se utiliza, como bien su nombre indica, para obtener superficies de revolución (tanto interiores como exteriores). El movimiento puede ser a lo largo de la anchura de la pieza a rectificar o en penetración, tal y como puede apreciarse en la Figura 6.19 a y b respectivamente. Los parámetros de un proceso de rectificado cilíndrico son (Figura 6.20): profundidad (a_e) y ancho (b) de pasada, velocidad de la herramienta (V_c), velocidad de avance (V_f) y velocidad de la pieza (V_w).

El rectificado cilíndrico puede producir, asimismo, geometrías dándole al disco la forma que se quiere en la pieza a rectificar. Por ejemplo, el rectificado de roscas se realiza en rectificadoras cilíndricas mediante discos especialmente afilados que coinciden con la forma de las roscas, como se muestra en la Figura 6.21. Aunque costosas, las rosas producidas por rectificado son las más precisas por el acabado tan fino que le da este proceso.

MEMORIA

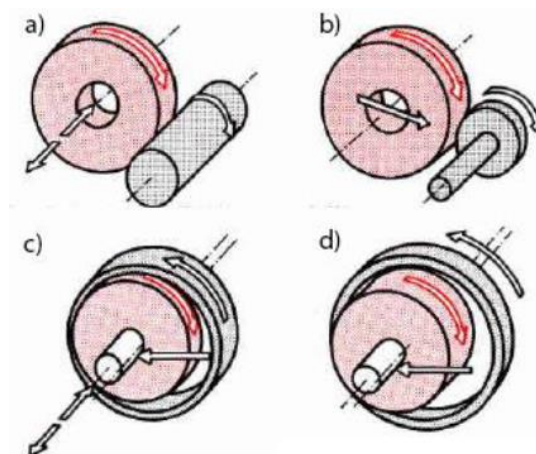


Figura 6.19. Tipos de rectificado cilíndrico: a) exterior longitudinal, b) exterior transversal, c) interior longitudinal y d) interior transversal [32].

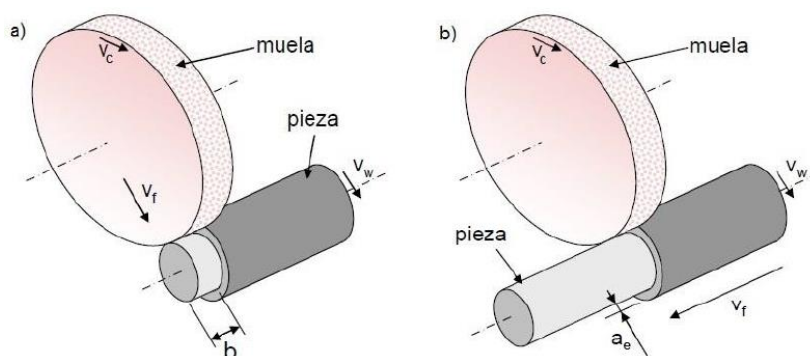


Figura 6.20. Parámetros del rectificado cilíndrico: a) transversal (penetración) y b) longitudinal [33].

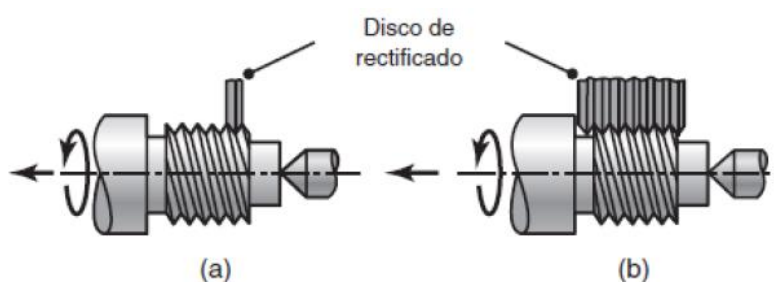


Figura 6.21. Rectificado de roscas mediante rectificado: a) transversal y b) de penetración [26].

En el rectificado de interiores (Figura 6.19 c y d), se suele utilizar un pequeño disco para los diámetros internos de piezas cilíndricas. Estos discos pueden moverse transversal o lateralmente, dependiendo del tipo de acabado que se le quiera otorgar a la pieza. El cabezal de las rectificadoras internas puede inclinarse en un plano horizontal para así poder acceder a orificios cónicos (Figura 6.9 i).

MEMORIA

6.6.3. Rectificado sin centros

El rectificado sin centros es un proceso de alta producción empleado para rectificar de manera continua superficies cilíndricas donde la pieza de trabajo no se sostiene entre centros (de ahí el concepto “sin centros”) ni platos, sino por una cuchilla regla de apoyo (Figura 6.22 a). Las piezas obtenidas comúnmente a partir de este método son los pernos de pistones, válvulas para motores, cigüeñales y componentes similares.

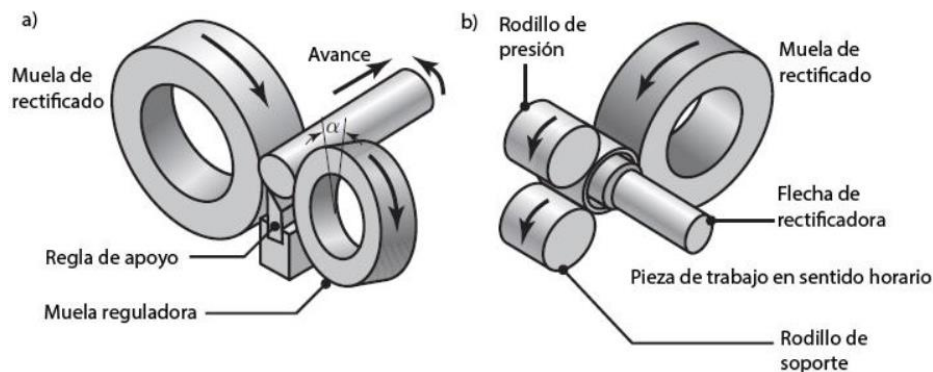


Figura 6.22. Esquema del rectificado sin centros (a) longitudinal y (b) interno y sus componentes (adaptada de referencia [26])

En el rectificado longitudinal (Figura 6.22 a), la pieza de trabajo se soporta mediante una regla de apoyo y se rectifica entre los dos discos. El rectificado se efectúa con el disco de mayor tamaño, mientras que la pequeña regla el movimiento axial de la pieza. El disco regulador se inclina y opera sólo a una vigésima parte de la velocidad del disco de rectificado [26].

Una variante de este procedimiento es el rectificado sin centros de penetración, al cual se le añade un tope al final de la pieza para evitar un movimiento a lo largo del eje de la pieza de trabajo. Esta operación es similar al rectificado cilíndrico de penetración (Figura 6.19 b) y se emplea para piezas con diámetro variable a lo largo de su superficie.

En el rectificado interno sin centros (Figura 6.22 b), la pieza de trabajo se soporta entre tres rodillos y se rectifica por la cara interna.

6.6.4. Rectificado de avance lento

Tradicionalmente, el rectificado se ha asociado con pequeñas velocidades de eliminación de material y operaciones con acabado fino. Sin embargo, también se pueden emplear en operaciones de eliminación de material a gran escala, similares a otros procesos de mecanizado como el brochado o el fresado [26, 35]. En el rectificado

MEMORIA

de avance lento o *Creep-feed grinding*, la profundidad de corte es mayor y la velocidad más baja que en el rectificado convencional. Para mantener bajas temperaturas de trabajo y mejorar el acabado superficial, los discos se componen de superabrasivo junto con una resina más blanda y de una estructura más abierta, para evitar el posible embotamiento del disco (Figura 6.10). La longitud de contacto es bastante mayor comparada con el mecanizado convencional. La mayor parte de la energía se evacúa por convección⁷ del fluido refrigerante. El rectificado de avance lento puede llegar a ser muy competitivo y económico frente a otros procesos de mecanizado en operaciones específicas como: ranuras para brocas helicoidales, raíces de los álabes de una turbina, etc.

6.6.5. Rectificado para eliminar grandes cantidades de material

También conocido como *High Efficiency Deep Grinding* (HEDG), es un procedimiento que se utiliza para arrancar mucho material aumentando los parámetros del proceso (alta profundidad de pasada, alta velocidad de trabajo y alta o muy alta velocidad de giro del disco). En esta operación, el acabado superficial es de importancia secundaria y el disco de rectificado se utiliza en su totalidad, minimizando así el coste. Las tolerancias dimensionales obtenidas a partir de este proceso son del mismo orden que las de la mayoría de los procesos de mecanizado, por lo que se presenta como una gran competencia frente a procedimientos convencionales.

La mayor parte de la energía producida se dispersa a través de la viruta; el refrigerante apenas evacúa un 10% de dicha energía. Aun así, es importante la refrigeración en la zona de contacto para reducir el rozamiento y, por tanto, la energía generada. Esto también permite que la superficie generada tras el rectificado no posea una temperatura excesivamente alta. Este tipo de proceso se emplea también para alisar los puntos de soldadura y eliminar rebabas.

En la Tabla 6.6, se puede apreciar una breve comparación entre los rectificados de alto rendimiento (HEDG y *Creep-feed*) y el rectificado convencional

⁷ Convección: A grandes rasgos, la convección es el transporte de calor por medio del movimiento del fluido.

MEMORIA

Tabla 6.6. Comparativa entre rectificados de alto rendimiento y convencional [35].

	Rectificado convencional	<i>Creep-feed grinding</i>	HEDG
Profundidad efectiva [mm]	0,01–0,05	0,1–30	0,1–30
Velocidad de trabajo [m/min]	1–30	0,05–0,5	0,5–10
Velocidad de giro [m/s]	20–30	20–30	80–200
Tasa de arranque [mm ³ /mm·min]	0,25–25	0,25–25	125–5000

6.7. Máquinas rectificadoras

Las rectificadoras son máquinas herramienta de gran precisión. Las piezas mecanizadas con ellas poseen gran exactitud de forma y medidas y presentan un buen acabado superficial. Como pasa con el tipo de rectificado, la selección de la maquinaria depende de la geometría y las propiedades de la pieza de trabajo y la producción requerida (Tabla 6.5). Hay tantos tipos de máquinas rectificadoras como tipos de rectificado.

En la sujeción de las piezas a rectificar no tiene tanta importancia la absorción de las fuerzas de corte como la exactitud de la posición, por lo que comúnmente se emplean elementos de fijación sencillos. En el rectificado plano se emplean tornillos portapiezas muy precisos, aunque en general se utilizan platos magnéticos, lo que requiere un suministro de corriente continua (los materiales no magnéticos se sujetan con prensas de banco, platos de vacío o algún otro soporte). Esto conlleva gastos adicionales y peligro por fallo de corriente por lo que, cada vez más, se utilizan las placas de imanes permanentes (independientes de la red). Las placas sujetas magnéticamente retienen un magnetismo residual que tiene que ser eliminado con aparatos de desmagnetización [32] más adelante.

6.7.1. Rectificadora planeadora

De acuerdo a los tipos de rectificados mostrados de forma esquemática en la Figura 6.17, existen dos combinaciones principales de máquinas rectificadoras: máquinas con husillo horizontal (o vertical) y mesa alternativa (Figura 6.23) y máquinas con husillo horizontal (o vertical) y mesa rotativa.

En las rectificadoras de superficies planas con mesa alternativa se rectifican superficies planas con la periferia del disco o con los laterales de la misma. En la rectificadora plana con mesa rotativa se fijan varias piezas de la misma altura y se rectifican con avance continuo con la cara frontal del disco. Esta máquina es especialmente apropiada para la producción en serie.

MEMORIA

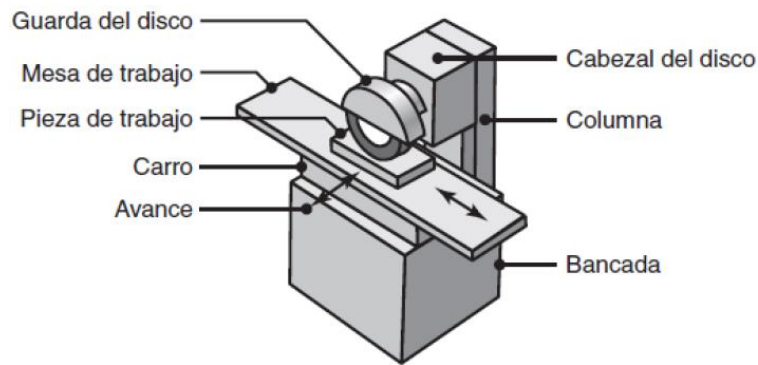


Figura 6.23. Esquema de una rectificadora de superficies planas con husillo horizontal y mesa alternativa [26]

Los principales parámetros de operación son:

- Velocidad del disco (V_c) [m/s]
- Velocidad de la pieza (V_f) [m/min]
- Profundidad de pasada (a_e) [μm]
- Ancho de pasada (b) [mm]

6.7.2. Rectificadora cilíndrica de exteriores

Se utiliza para el rectificado de superficies exteriores cilíndricas y cónicas, ya sea longitudinal o transversalmente. Partiendo de piezas cilíndricas se obtiene cualquier forma de la superficie exterior mediante el uso de discos con un perfil predeterminado (Figura 6.24).

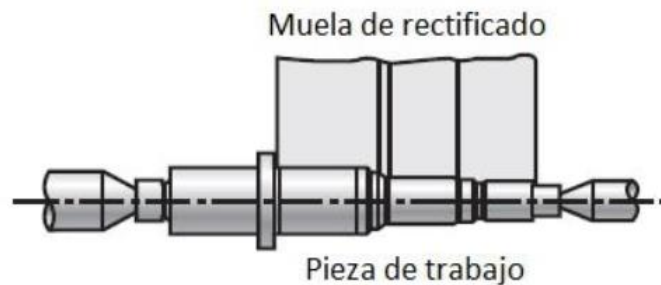


Figura 6.24. Rectificado por penetración de una pieza cilíndrica en una rectificadora cilíndrica con el disco afilado en forma escalonada (adaptada de referencia [26])

La pieza de trabajo está siempre sujeta entre dos puntos fijos. Para superficies cilíndricas rectas, los ejes de rotación del disco y la pieza de trabajo son paralelos. El disco y la pieza se accionan cada uno mediante motores separados y adquieren diferentes velocidades.

Gracias a las características del control numérico, las partes no cilíndricas de una pieza se pueden rectificar con este tipo de maquinaria. Para ello es necesario que la velocidad

MEMORIA

del husillo de la pieza se sincronice de tal forma que la distancia entre la pieza y el disco varíe continuamente para producir una forma determinada.

6.7.3. Rectificadora cilíndrica de interiores

Existe la posibilidad de añadirle a la rectificadora cilíndrica de exteriores un dispositivo que permita rectificar interiores de piezas (el disco trabaja en voladizo), lo que se conoce como rectificadora cilíndrica universal (ver Figura 6.25).

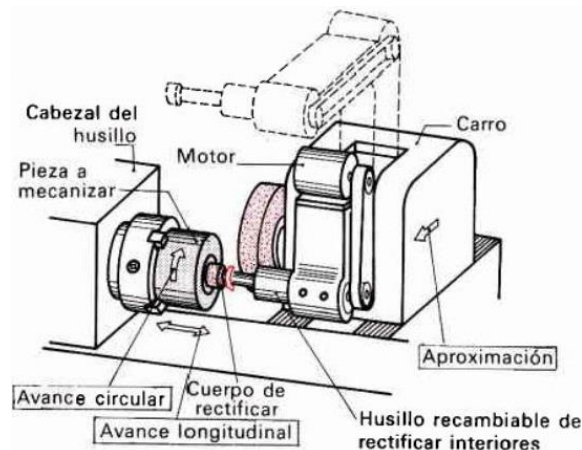


Figura 6.25. Esquema de una rectificadora cilíndrica universal [32]

La pieza a rectificar debe sujetarse de forma que la fuerza de sujeción no la deforme. Por ello es común el uso de mandriles especiales para esta operación.

Los parámetros principales para el rectificado cilíndrico, ya sea exterior o interior, son:

- Velocidad del disco (V_c) [m/s]
- Velocidad de la pieza (V_w) [m/min]
- Velocidad de avance (V_f) [mm/min]
- Profundidad de pasada (a_e) [μm]

6.7.4. Rectificadora sin centros

En este caso, la pieza a rectificar, sin ningún tipo de sujeción, es guiada entre el disco de rectificar y la de regulación (de aglomeración blanda). Para conseguir el avance longitudinal, el disco de regulación debe estar inclinado hacia delante un ángulo de hasta 3° ; a mayor inclinación, mayor velocidad de avance (Figura 6.26). La pieza debe pasar varias veces por la máquina hasta que alcance su medida efectiva. En el rectificado de penetración, el disco de regulación no tiene inclinación. Ésta se desplaza hacia la herramienta hasta que se alcanza la medida efectiva.

MEMORIA

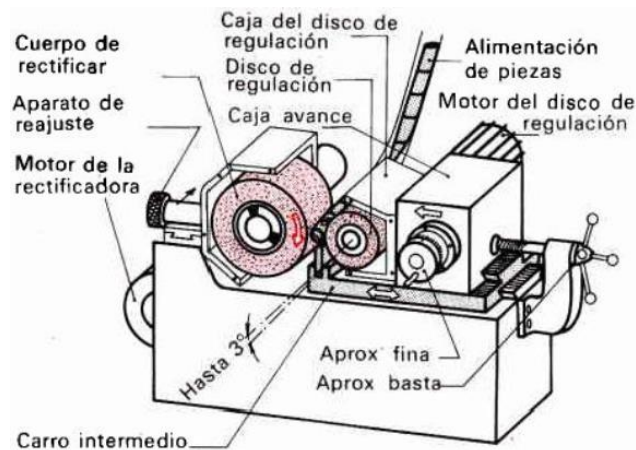


Figura 6.26. Rectificadora cilíndrica sin centros preparada para el rectificado en serie [32].

A grandes rasgos, las principales características de este tipo de rectificado y su maquinaria serían [33, 35]:

- Eliminación de tiempos de centrado y amarre de la pieza
- Posibilidad de usar discos de gran anchura sin deformar la pieza (esto maximiza la tasa de arranque con el consiguiente ahorro de tiempo que supone)
- Sin errores de centrado (alta precisión)
- Versatilidad geométrica (piezas pequeñas de revolución, piezas de gran esbeltez de revolución, largas tiradas, etc)
- Fácil de automatizar

6.7.5. Rectificadora de herramienta universal

Es una máquina que se utiliza para el rectificado de herramientas pequeñas y medianas para otros procesos de mecanizado. Es particularmente apropiada para rectificar herramientas cilíndricas y cónicas con ranurados helicoidales. Puede emplearse además en el afilado de escariadores, avellanadoras, brocas de roscar, fresas, etc. Se le pueden instalar accesorios especiales para el rectificado plano y cilíndrico de piezas de pequeñas dimensiones [32].

6.8. Fluidos de rectificado

Los fluidos de cortes se utilizan ampliamente en las operaciones de mecanizado (y sobre todo en mecanizado abrasivo) para obtener:

- Reducción de la fricción y el desgaste, mejorando así la vida útil de la herramienta y el acabado superficial de la pieza de trabajo.
- Enfriamiento de la zona de corte, mejorando de esta forma la vida útil de la herramienta y reduciendo la temperatura y la distorsión térmica de la pieza de trabajo.

MEMORIA

- Reducción de fuerzas y consumo de energía
- Retirada de las virutas de la zona de corte, evitando que interfieran en el proceso.
- Proteger la superficie mecanizada de la corrosión ambiental.

Según el tipo de mecanizado, el fluido de corte necesario puede ser un refrigerante, un lubricante o ambos. La efectividad de los fluidos de corte depende de factores como el tipo de operación de mecanizado, los materiales de la herramienta y de la pieza, la velocidad de corte y el método de aplicación [26].

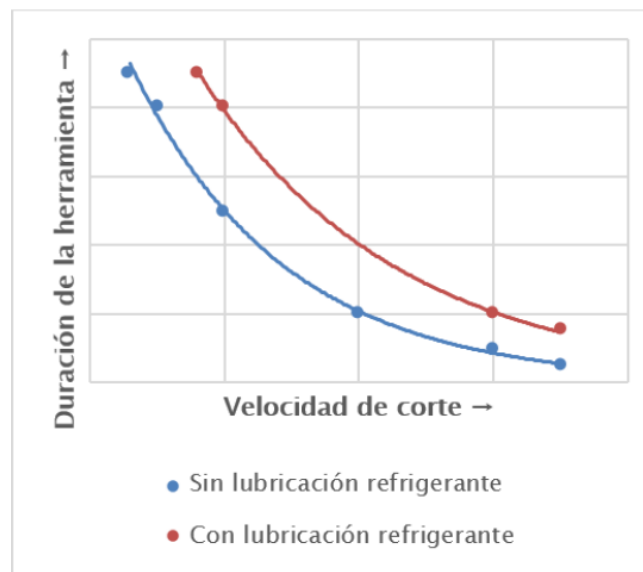


Figura 6.27. Efecto de la lubricación en la temperatura y la velocidad de corte. La lubricación refrigerante prolonga la vida de la herramienta y aumenta la velocidad de corte posible [32]

Por lo general, los fluidos de rectificado son emulsiones acuosas para rectificado general y aceites para rectificado de roscas (Tabla 6.7). Pueden aplicarse como un chorro (inundación) o como niebla (mezcla de fluido y aire). Debido a las altas velocidades implicadas, una cortina de aire en la periferia del disco impide que el fluido alcance la interfaz pieza-herramienta por lo que se han diseñado boquillas especiales de alta presión que se adapten a la forma de la superficie de corte del disco.

Puede darse un aumento de la temperatura de los fluidos de rectificado acuosos conforme se extrae el calor de la zona de rectificado. Esto provoca que la pieza experimente dilataciones, dificultando el control de las tolerancias dimensionales. Para evitar este efecto, es común el uso de enfriadores por medio de los cuales se hace pasar el fluido de forma continua y se mantiene así siempre a la misma temperatura.

MEMORIA

Tabla 6.7. Recomendaciones generales para los fluidos en el rectificado [26]

Material	Fluido para rectificado
Aluminio	E, EP
Cobre	CSN, E, MO+FO
Magnesio	D, MO
Níquel	CSN, EP
Aceros	CSN, E
Titanio	CSN, E

D = Seco, E = Emulsión, EP = Presión extrema, CSN = Químicos y sintéticos, MO = Aceite mineral, FO = aceite graso

6.9. Consideraciones de diseño para el rectificado

Las consideraciones de diseño para el rectificado son similares a las de otros procesos de mecanizado, poniendo especial atención en lo siguiente:

- Las partes a rectificar deben diseñarse de tal forma que puedan montarse con firmeza en platos, mesas magnéticas y dispositivos específicos para la sujeción. Las piezas de trabajo delgadas, rectas o tubulares pueden deformarse durante el rectificado, por lo que requieren cierta atención.
- Si se exige alta precisión dimensional, deben evitarse interrupciones en la superficie (como orificios o chavetas), ya que esto puede provocar vibraciones y traqueteo.
- Las piezas para rectificado cilíndrico deben equilibrarse y evitar los diseños largos y delgados, con el objetivo de minimizar las desviaciones. Los filetes y radios de acuerdo deben ser tan grandes como sea posible o tienen que ser mecanizados previamente para liberar tensiones.
- En el rectificado sin centros puede ser complicado rectificar con precisión piezas cortas debido a la falta de soporte en la cuchilla. Si se quiere rectificar una pieza con varios diámetros, en un rectificado de paso completo sólo será posible rectificar la parte que posea mayor diámetro.
- Deben evitarse en la medida de lo posible orificios profundos y pequeños, así como orificios ciegos que requieran rectificado interno, ya que es muy probable que la pieza requiera un alivio de tensiones.

Normalmente, los diseños requieren una cantidad mínima de previo arranque de material, excepto en rectificado de avance lento. Además, para conseguir una buena precisión dimensional, el diseño debe permitir que todo el rectificado se pueda realizar sin tener que realinear la pieza.

MEMORIA

Reglas de trabajo

El proceso de rectificado se puede realizar en tres etapas:

- Desbaste: Arranque de virutas fuerte, mejora de la forma de la pieza mecanizada, eliminación de estrías
- Acabado: Mejora del acabado superficial
- Fino: mejora ulterior del acabado superficial

Para estas tres etapas se pueden tomar como referencia los siguientes parámetros en cuanto a discos y profundidades de corte (ver Tabla 6.3):

- Desbaste
 - Grano 40–60
 - Profundidad de corte entre 10 y 30 μm
- Acabado
 - Grano 80–100
 - Profundidad de corte entre 5 y 15 μm
- Fino
 - Grano 200–300
 - Profundidad de corte entre 1 y 8 μm

Antes de rectificar, la pieza normalmente ha pasado por otro tipo de mecanizado no abrasivo, como por ejemplo el torneado, fresado, etc. En estos procesos se les suele dejar una sobremedida para el rectificado que varía entre 0,1 y 0,6 mm, cumpliendo así con las exigencias de forma de la pieza.

También es conveniente analizar si el rectificado va a ser en seco o húmedo. En el caso de que sea seco, el polvo producido debe ser aspirado. En un rectificado húmedo, el líquido refrigerante y lubricante (ver Tabla 6.7) descarga el calor y el polvo. Este tipo de rectificado debe usarse si se quiere que el disco sufra poco desgaste.

6.10. Rectificado de Ti

6.10.1. Introducción

Rectificar titanio mediante las prácticas convencionales expuestas con anterioridad resulta en una elevada temperatura de trabajo y reacciones químicas entre la pieza de trabajo y el abrasivo. Esto conlleva problemas con la durabilidad de la vida de la herramienta, el acabado superficial de la pieza, etc. Estos problemas se pueden evitar mediante las siguientes pautas [25]:

MEMORIA

- Elegir un abrasivo que produzca un flujo de viruta controlado y progresivo, con un tamaño pequeño.
- Usar velocidades bajas para minimizar la temperatura de rectificado y reacciones de soldadura. Al disminuir la temperatura de rectificado, las tensiones residuales tras el proceso también son menores, lo que mejora el comportamiento de la pieza ante la presencia de grietas.
- Utilizar fluido de rectificado que minimice las fuerzas cortantes que se producen entre el grano y la pieza.

Para rectificar titanio y sus aleaciones, se emplean profundidades relativamente pequeñas y se reacondicionan las herramientas periódicamente para mantener el disco en perfectas condiciones de corte. Excesiva carga en el disco provoca un acabado superficial pobre, altos niveles de tensiones residuales y una relación de rectificado (6.6) bastante baja.

6.10.2. Propiedades de los discos para el rectificado de titanio

En condiciones normales de operación, un disco de rectificado debe sufrir un mayor desgaste por atrición o pérdida de filo de grano (ver apartado 6.9.3). La atrición conlleva una pérdida continua del filo de corte de cada grano del abrasivo. Esto es seguido por una fractura intergranular, la cual provoca que aparezcan nuevos filos de corte hasta que el grano abandone completamente el disco. Si el grano rompe lentamente, el material eliminado de la pieza de trabajo se deposita en y entre los granos de abrasivo. Esto provoca que el disco sea cada vez más blando y la relación de rectificado baje. Un disco de rectificado excesivamente blando puede provocar quemados en la superficie de la pieza, tensiones residuales altas y grietas superficiales. Si, por el contrario, el grano rompe demasiado rápido, el desgaste del disco sería excesivo para el proceso de rectificado [25].

Se pueden encontrar discos de rectificado con multitud de combinaciones de tamaño de grano, dureza, aglutinantes, etc., dependiendo de las condiciones específicas de operación. La Figura 6.10 y la Figura 6.11 muestran las posibles combinaciones de propiedades de un disco de rectificado y su nomenclatura convencional.

La elección de un tipo de abrasivo u otro (carburo de silicio u óxido de aluminio, ver apartado 6.9.1) dependerá de las condiciones de aplicación del rectificado. El carburo de silicio normalmente produce un mejor acabado superficial. Por otro lado, el óxido de aluminio da menos tensiones residuales en la pieza ya que requiere velocidades más lentas. El carburo de silicio necesita de refrigeración para poder operar que dependiendo

MEMORIA

del tipo y junto con las velocidades más altas de rectificado, puede llegar a producir un serio peligro de incendio.

La eficiencia del proceso de rectificado se ve también influenciada por el tamaño de grano empleado, ya que éste afecta al ratio de fractura intergranular y, por lo tanto, a la creación de nuevos filos de corte. Granos pequeños tienden a abandonar el disco prematuramente, por lo que el desgaste de la herramienta aumenta. Granos más grandes tienen, por lo general, mayor dificultad para penetrar la superficie de la pieza.

Los tamaños que normalmente se manejan son 60–80 para el óxido de aluminio y 80–100 para el carburo de silicio (ver Tabla 6.3) según codificación ANSI [25].

El aglutinante empleado es el que determina la dureza de la herramienta. Por regla general, es deseable utilizar la herramienta más dura, ya que estropea menos la superficie de la pieza a rectificar. Por esta razón, los grados intermedios J a M son los más utilizados en el rectificado de titanio (Figura 6.10). Por ejemplo, el grado “M” en herramientas de óxido de aluminio da una relación de rectificado entre un 30 y un 50 por ciento mayor que el grado “K”, más blando. Sin embargo, los discos más blandos tienen un mejor desempeño a velocidades altas; cuanto más dura sea la herramienta, menor será su velocidad permitida para obtener un buen resultado [25].

Los aglutinantes vitrificados dan mejores resultados gracias a que son mucho más porosos. Esto permite una mejor evacuación de la viruta, resultando en menores temperaturas de rectificado.

6.10.3. Condiciones de operación

Para obtener un proceso óptimo de rectificado de titanio es necesario, sobre todo, tener una maquinaria de alta calidad, con un alto rango de velocidades, y libre de vibraciones.

Para un determinado disco de rectificado con cierto refrigerante, la elección de un rango óptimo de velocidades puede producir una relación de rectificado (6.6) mucho mayor que una velocidad 10 veces mayor o menor. Por ejemplo, para un disco de óxido de aluminio 32A60VBE, el rango de velocidades óptimo sería entre 1500 y 2800 rpm con aceites o inhibidores de la oxidación como fluidos de corte. Para discos de carburo de silicio, el rango óptimo de velocidades parece estar entre 4000 y 4500 rpm usando emulsiones como refrigerante. Este rango puede elevarse hasta las 6000 rpm, pero supondría dañar significativamente la superficie de la pieza [25].

MEMORIA

Es de gran importancia utilizar fluidos de rectificado que enfríen de forma eficiente e inhibir la aparición de reacciones químicas entre el titanio y el disco de abrasivo. El titanio y sus aleaciones nunca deberían ser rectificadas en seco, ya que esto da lugar a excesivas tensiones residuales y malos acabados superficiales, además de aumentar el riesgo de incendio [25].

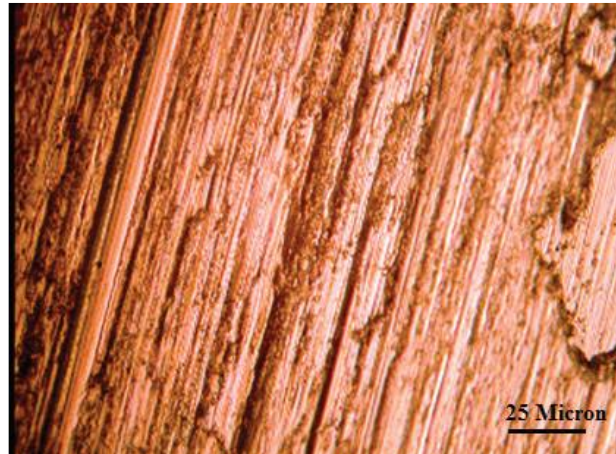


Figura 6.28. Imagen SOM de la calidad superficial obtenida mediante el rectificado en seco de la aleación Ti6Al4V [38].

El uso de simplemente agua no es recomendable, y las emulsiones más comunes no producen buenas relaciones de rectificado, aunque disminuyen en gran medida el riesgo de incendio anteriormente mencionado.

Aceites con altos niveles de cloro son los que mejor efecto tienen sobre la relación de rectificado (6.6), especialmente si se usan discos de carburo de silicio. Por otro lado, los inhibidores de la oxidación basados en el tipo nitrito-amina, son los que mejores resultados poseen con los discos de óxido de aluminio [25].

El grado de concentración o de dilución de un fluido juega un papel importante en el proceso de rectificado. Las máximas relaciones de rectificados se obtienen con aceites sin diluir; cuando los aceites de rectificado son mezclados con otro tipo de sustancias, muchas de sus ventajas se pierden [25].

Todos los fluidos deberían ser filtrados para eliminar el abrasivo y restos para evitar dañar la superficie. También es recomendable cambiar el fluido con más frecuencia que con el resto de metales.

MEMORIA

6.11. Comparación del rectificado con otros procesos de corte

En una primera aproximación, se compara el rectificado con otros procesos de mecanizado abrasivo, los cuales han sido explicados previamente. Por lo general, todos los procesos abrasivos son procesos poco eficientes, lentos y costosos, aunque obviamente, existen diferencias entre ellos que hacen que tengan una aplicación u otra (Tabla 6.8).

Tabla 6.8. Comparativa de mecanizados abrasivos [33]

	Rectificado	Lapeado	Pulido	Bruñido
Forma	Muy buena	Excelente	–	Excelente
Acabado	Bueno	Muy bueno	Excelente	En cruceta
Partículas	Aglomeradas	Sueltas	Sueltas	Aglomeradas

Si se observa la Tabla 6.9, se puede apreciar los distintos tamaños de grano que se utilizan en cada proceso. El pulido y el lapeado son procesos donde el acabado es extremadamente fino, por lo que el tamaño de grano va acorde a las características requeridas. En el rectificado, al haber varias fases, el tamaño de grano va variando desde muy basto hasta fino dependiendo del resultado esperado.

Tabla 6.9. Designación del tamaño de grano para distintos mecanizados abrasivos [39].

Rectificado				Pulido	Lapeado
<i>Muy basto</i>	<i>Basto para desbaste</i>	<i>Medio</i>	<i>Fino para acabado</i>		
80	12	30	70	150	280 800
10	14	36	80	180	320 1000
	16	46	90	220	400 1200
	20	54	100	240	500
	24	60	120		600

Al igual que con el tamaño de grano, la selección adecuada de los parámetros del proceso como son la velocidad y el avance puede mejorar la capacidad de un material a ser rectificado y permite obtener un acabado final con diferentes características. En la Tabla 6.10, se pueden observar los rangos típicos de velocidades y avances para distintos procesos abrasivos.

MEMORIA

Tabla 6.10. Intervalos característicos de velocidades y avances para procesos abrasivos [26]

Variable del proceso	Rectificado convencional	Rectificado de avance lento	Pulido	Abrillantado
Velocidad de disco (m/min)	1500–3000	1500–3000	1500–2400	1800–3500
Velocidad de la pieza (m/min)	10–60	0,1–1	–	–
Avance (mm/vuelta)	0,01–0,05	1–6	–	–

En cuanto al rectificado respecto a otros procesos de corte (torneado, fresado, etc), hay varias diferencias a destacar:

- El espesor de la viruta es mucho más pequeño en el rectificado ($0,1\text{--}1\text{ }\mu\text{m}$) que en el torneado ($10\text{--}100\text{ }\mu\text{m}$), lo que conlleva, entre otros efectos, que el consumo de energía sea mucho mayor en el corte con abrasivos (Figura 6.29) [33].
- El ángulo de desprendimiento en el rectificado es muy negativo en comparación con el torneado o el fresado, en los cuales suele ser positivo o ligeramente negativo. Esto provoca la presencia de deformaciones plásticas justo en la zona de corte por lo que éste es mucho menos eficiente.

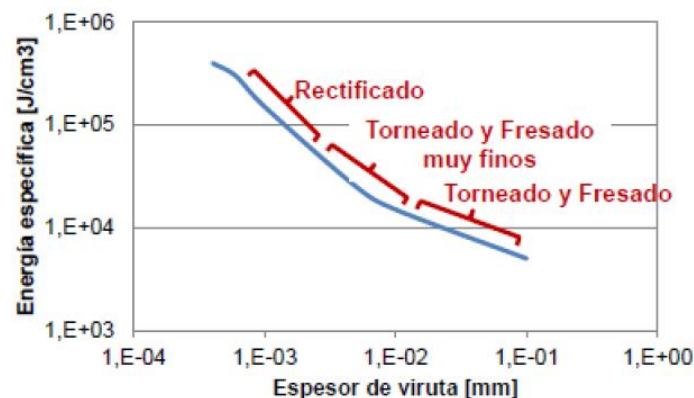


Figura 6.29. Efecto del tamaño de la viruta en la energía específica del proceso

- La relación de fuerzas también es distinta: en el rectificado la componente normal de la fuerza es la que tiene mayor valor, justo lo contrario que en procesos como el torneado o el fresado, donde predomina la componente tangencial (ver Figura 6.30).
- La velocidad de corte de la herramienta es mucho más alta en el rectificado que en el torneado o fresado, en los cuales es inferior a 6 m/s .

MEMORIA

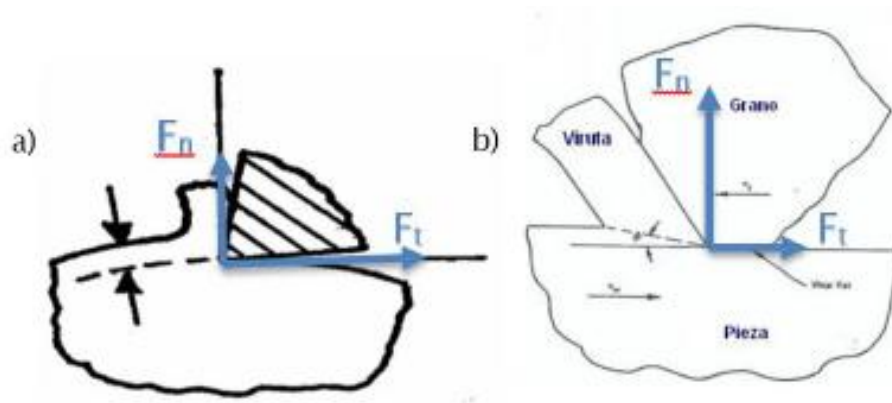


Figura 6.30. Componentes de la fuerza en: a) torneado y b) rectificado.

Capítulo 7

7. Evaluación de la integridad superficial

En este capítulo se detallan y explican los métodos y parámetros necesarios para la identificación y cuantificación de los aspectos micro y macrogeométricos, así como, propiedades físico-químicas, considerados de interés en este trabajo. A partir de estas se pretende evaluar cómo influyen las operaciones ejecutadas en cada ensayo en el acabado y propiedades del material. La justificación y propiedad evaluada por cada aspecto se detalla a continuación:

- Microgeometría: Mediante la medición de la rugosidad se pretende evaluar la calidad o acabado superficial obtenido con las diferentes operaciones de rectificado ejecutadas, aspecto de vital importancia en la justificación de este proceso como operación de acabado posterior a otros procesos.
- Macrogeometría: El acabado de las piezas es también evaluado en función de las posibles desviaciones geométricas generadas por el proceso, considerándose como suficiente la evaluación de la redondez, cilindridad y rectitud dada la geometría cilíndrica de dichas piezas.
- Propiedades físico-químicas: Entre las diferentes propiedades físico-químicas del material, se opta por la evaluación de la microdureza superficial con la idea de analizar, a partir de esta, si las operaciones realizadas en cada ensayo afectan a la estructura física del material.

7.1. Microgeometría

Este es el principal atractivo del proceso de rectificado ya que, a pesar de ser un procedimiento que encarece mucho el precio final, se utiliza por el buen acabado que deja en las piezas.

Es evaluada a partir de la rugosidad, la cual nos permite conocer cuan imperfecta es la superficie que se está midiendo, es decir, informa de las irregularidades que ésta posee mediante una serie de perfiles y parámetros de rugosidad. Las mediciones se realizan con un rugosímetro dotado de un palpador, el cual permite obtener perfiles de rugosidad R, D, G, P y W, aunque los más comunes son el R, W y P.

MEMORIA

- **Perfil primario P**

Es el perfil real de la superficie medida junto a las limitaciones del propio palpador.

- **Perfil de rugosidad R**

Perfil obtenido a partir del perfil primario tras eliminar tanto la primera como la última longitud medida de cut-off.

- **Perfil de ondulación W**

Perfil obtenido a partir del perfil primario tras eliminar altas y bajas longitudes de ondas tras aplicar un filtro.

Para el estudio de la rugosidad se toma como principal parámetro la rugosidad media aritmética, o R_a , ya que es el parámetro más extendido. Este parámetro se define como:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (7.1)$$

Donde (x) es la altura del perfil de rugosidad en cada punto medido por el palpador [40] (ver Figura 7.1).

Ra – parámetro acorde a ISO 4287

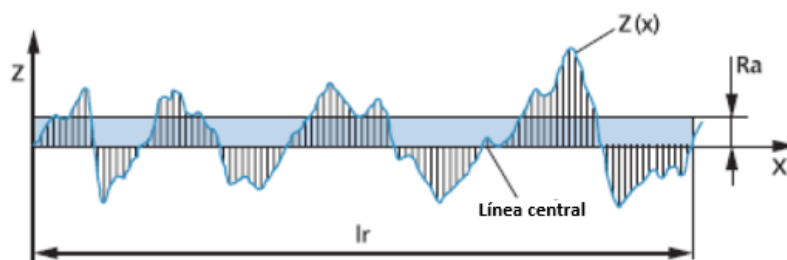


Figura 7.1. Esquema del parámetro R_a . El término l_r es la medida de muestra, también conocida como cut-off.

Además de éste, existen otros parámetros que aportan más información sobre el perfil de rugosidad de la pieza [40]:

- **R_z : rugosidad media**, es la media aritmética de los valores de rugosidad parcial (R_{zi}) correspondientes a cada uno de los módulos integrantes de la longitud de la medición. El tramo individual de mayor R_{zi} se designa como $R_{z\text{máx}}$ (ver Figura 7.2).

MEMORIA

Rz, Rz1max, Rt – parámetros acordes a ISO 4287

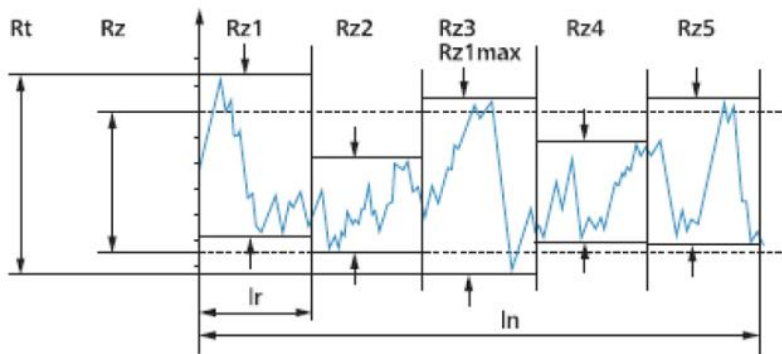


Figura 7.2. Esquema de los parámetros Rz_i , $Rz_{máx}$ y Rt .

- Rt : altura total del perfil, es la distancia entre el pico más alto y el valle más profundo del perfil de rugosidad (Figura 7.2).
- Rq : rugosidad media cuadrática, es la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de los valores de la altura del perfil de rugosidad, en relación a la línea media (7.2).

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l Z(x)^2 dx} \quad (7.2)$$

- Rp : cresta mayor del perfil, altura de dicha cresta medida a partir de una altura de discriminación (inferior a la línea media).

El valor de Rp sería determinante en el caso de que la pieza mecanizada fuera a formar parte de un ajuste. Si éste es con aprieto, un valor demasiado lejano a la cota máxima del eje (en términos del radio) podría provocar daños tanto en el eje como en el agujero. Por el contrario, si el ajuste es con juego, un valor de Rp demasiado grande haría que el eje no deslizara correctamente, impidiendo así la función del ajuste.

RP_c – parámetro acorde a EN 10049

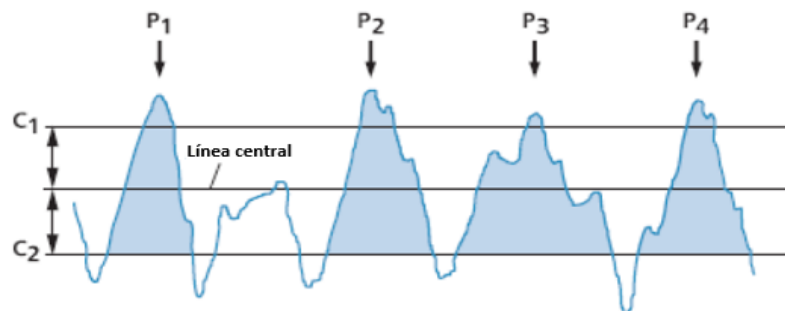


Figura 7.3. Esquema del parámetro Rp

MEMORIA

- R_{sm} : anchura media de los elementos del perfil. Al igual que R_p , se requiere la definición de dos alturas de discriminación (flanqueando la línea media). La diferencia entre esas dos cotas determina la exigencia del acabado superficial de la pieza, es decir, cuanto mejor acabado se exija, más juntas estarán las dos alturas de discriminación.

R_{sm} – parámetro acorde a ISO 4287

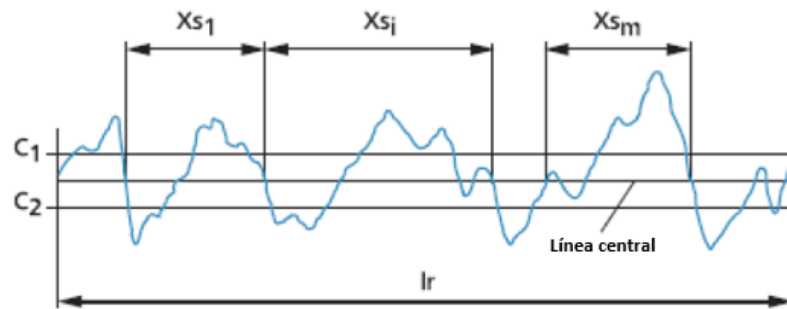


Figura 7.4. Esquema del parámetro R_{sm}

7.2. Macrogeometría

El análisis de forma o macrogeometría arroja unos resultados que proporcionan información sobre la calidad dimensional de la pieza. Básicamente, consiste en tres tipos de ensayo: cilindridad, redondez y rectitud.

7.2.1. Cilindridad

La cilindridad, como su propio nombre indica, es la propiedad de un cilindro que mide cuánto se desvía éste del cilindro nominal. Se entiende por cilindro nominal aquel cuyas secciones transversales circulares forman un ángulo recto con su eje. La cilindridad puede medirse tanto en superficies internas como externas [41].

En el estudio de la cilindridad interviene la desviación local de cilindridad, ΔC_1 , la cual se define como la desviación de un punto sobre la superficie de cilindridad del cilindro de referencia, siendo la desviación perpendicular al cilindro de referencia. La cilindridad puede medirse tanto en superficies internas como externas [41].

Los parámetros empleados en el análisis de la cilindridad son [41]:

- Desviación de cilindridad pico – valle: Valor de la desviación local de cilindridad positiva más grande sumada al valor absoluto de la desviación local de cilindridad negativa más grande.

MEMORIA

- Desviación de cilindridad pico – referencia: Valor de la desviación local de cilindridad positiva más grande con respecto al cilindro de referencia por mínimos cuadrados.
- Desviación de cilindridad referencia – valle: Valor absoluto de la desviación local de cilindridad negativa más grande con respecto al cilindro de referencia por mínimos cuadrados.
- Desviación cuadrática media de cilindridad, ΔC_{rms} , que es la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las desviaciones locales de cilindridad con respecto al cilindro de referencia por mínimos cuadrados [41]. Viene dada por la expresión (7.3).

$$\Delta C_{rms} = \sqrt{\frac{1}{A} \int_A \Delta C_1^2 dA} \quad (7.3)$$

donde,

- A es el área superficial del elemento geométrico cilíndrico.

7.2.2. Redondez

La redondez es una propiedad del cilindro que mide cuanto de redonda es la superficie de su plano de redondez, que es plano perpendicular al eje del cilindro dentro de la extensión completa del elemento [42].

La redondez se mide respecto de un círculo de referencia y se extrae la desviación local de redondez, ΔR_1 , que es la mínima distancia de un punto sobre el perfil de redondez al círculo de referencia [42].

Para el estudio de la redondez, se emplea los siguientes parámetros [42]:

- Desviación de redondez pico – valle: Valor de la desviación local de redondez positiva más grande sumada al valor absoluto de la desviación local de redondez negativa más grande.
- Desviación de redondez pico – referencia: Valor de la desviación local de redondez positiva más grande con respecto al círculo de referencia por mínimos cuadrados.
- Desviación de redondez referencia – valle: Valor absoluto de la desviación local de redondez negativa más grande con respecto al círculo de referencia por mínimos cuadrados.
- Desviación cuadrática media de la redondez, ΔR_{rms} , que es la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las desviaciones locales de redondez con respecto del círculo de referencia por mínimos cuadrados [42]. Viene dada por la expresión (7.4).

MEMORIA

$$\Delta R_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \Delta R_1^2 d\theta} \quad (7.4)$$

donde,

- θ es el ángulo instantáneo en el perfil de redondez.

7.2.3. Rectitud

La rectitud mide la desviación de una línea recta respecto de otra de referencia, la cual suele venir dada por la intersección del plano de rectitud y la superficie. El plano de rectitud incluye a la normal a la superficie por defecto [43].

Se define como desviación local de la rectitud, ΔS_1 , como la desviación de un punto sobre el perfil de rectitud respecto a la línea de referencia, siendo la desviación perpendicular a la línea de referencia [43].

Los parámetros más característicos del estudio de la redondez son [43]:

- Desviación de rectitud pico – valle: Valor de la desviación local de la rectitud positiva más grande sumada al valor absoluto de la desviación local de la rectitud negativa más grande.
- Desviación de rectitud pico – referencia: Valor de la desviación local de la rectitud positiva más grande con respecto a la línea de referencia por mínimos cuadrados.
- Desviación de rectitud referencia – valle: Valor absoluto de la desviación local de la rectitud negativa más grande con respecto de la línea de referencia por mínimos cuadrados.
- Desviación cuadrática media de rectitud, ΔS_{rms} : Raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las desviaciones locales de rectitud con respecto de la línea de referencia por mínimos cuadrados. Viene dada por la expresión (7. 6).

$$\Delta S_{rms} = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L \Delta S_1^2 dX} \quad (7.6)$$

donde

- X es la posición instantánea en el perfil de rectitud;
- L es la longitud de la línea de referencia.

7.3. Microdureza

El análisis de microdureza consiste en un método que mide la resistencia que presenta un material al ser penetrado por un indentador. A diferencia de otros, este método produce una huella tan pequeña que solo es observable mediante un microscopio.

MEMORIA

Se tienen varios métodos para la medición de la dureza, pero el método Vickers siguiendo las normas ASTM E-92 y ASTM E-384 [44 y 45]. El indentador que se introduce en la superficie de la pieza tiene forma piramidal, como se puede apreciar en la Figura 7.1 a).

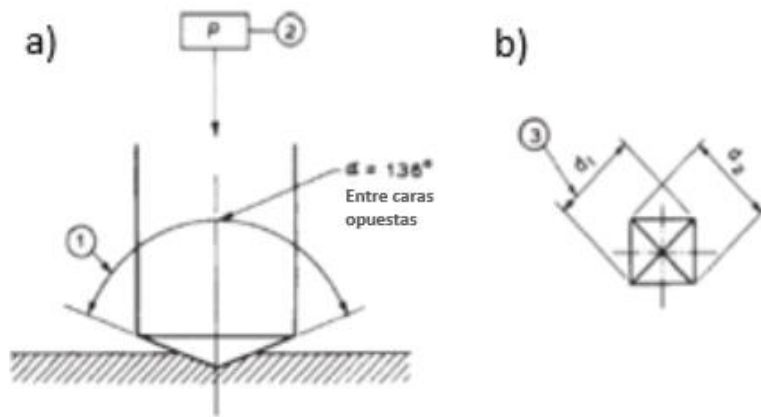


Figura 7.5. a) Geometría del indentador y b) geometría de la huella.

Antes de iniciar la toma de datos, se debe comprobar la calibración de la máquina y se ha de cuidar mucho la presencia de vibraciones durante el proceso de indentación, que la superficie que va a ser penetrada sea apta y que las distintas tomas estuviesen lo suficientemente separadas para que no ejerzan influencias unas sobre otras. La indentación deja una marca en la superficie de la pieza como la que se muestra en la Figura 7.6 y Figura 7.5 b).

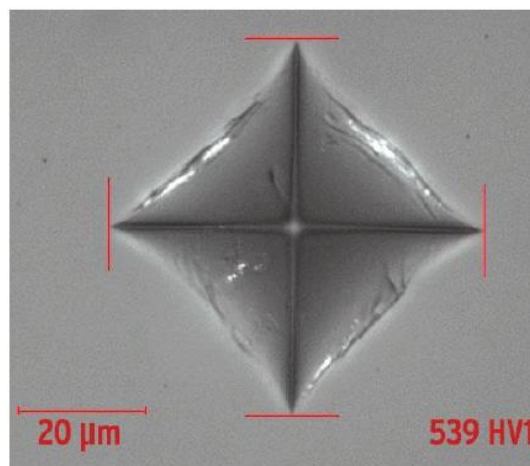


Figura 7.6. Geometría de la huella del indentador.

El microdurómetro está dotado de un software que está programado para calcular directamente el resultado de la dureza Vickers a partir de la ecuación (7.5):

$$HV = 1000 \cdot 10^3 \cdot \frac{P}{A_s} = 2000 \cdot 10^3 \cdot P \cdot \frac{\sin \alpha}{d^2} \quad (7.5)$$

MEMORIA

donde:

- P es la fuerza aplicada en gf
- A_s es la superficie de indentación en μm^2
- d es la diagonal principal de indentación en μm
- α es el ángulo de la cara del indentador

Para determinar la dureza, hay que definir los límites de la huella, para poder conocer su geometría y los parámetros necesarios para el cálculo. La fuerza de aplicación siempre va a ser conocida ya que se define previamente a la realización de los ensayos en el mismo software.

Capítulo 8

8. Metodología experimental

En este capítulo se describe toda la metodología experimental requerida para el estudio del proceso de rectificado cilíndrico de la aleación Ti6Al4V, propuesto en este trabajo. El alcance de este capítulo se desarrolla desde la preparación de las probetas cilíndricas hasta la medición de la micro y macro geometría, así como, la microdureza de tales probetas. Así pues, se diferencian fácilmente un primer apartado sobre el protocolo de ensayos y un segundo sobre tal evaluación metrológica.

8.1. Protocolo de ensayos

En este primer apartado se detallan, así como, se señalan aspectos de relevancia técnica en la ejecución de las operaciones o procesos necesarios para la realización de los ensayos. La descripción de cada operación se desarrolla en cada una de las siguientes secciones, ordenadas según la cronología seguida.

8.1.1. Preparación de la probeta

Como ya se viera en el Aleaciones de Titanio y aplicación en la aeronáutica, el titanio destaca además de por su ligereza o resistencia a condiciones hostiles, por sus propiedades mecánicas, siendo su dureza y resistencia a los esfuerzos lo suficientemente elevadas como para dificultar, en gran medida, su mecanizado. Considerando esta difícil maquinabilidad, para la obtención de las probetas de la aleación Ti6Al4V se optó por un proceso de mecanizado no convencional; el corte por chorro de agua con abrasivo o AWJM (en inglés *abrasive waterjet machining*), a razón de su conformidad en el mecanizado de aleaciones de titanio [46 y 47]. Para esta operación se ha empleado el sistema de corte waterjet TCI Cutting modelo BP-C 3020-1, situado en el Taller Mecánico de la Escuela Superior de Ingeniería de la Universidad de Cádiz (ver Figura 8.1).

De esta forma se consiguió mecanizar una barra de Ti6Al4V en forma cilíndrica de 2 metros de longitud y 25,4 mm de diámetro, en 4 secciones de 158 mm, longitud suficiente para su empleo en posteriores equipos. En la Tabla 8.1 se recogen los parámetros de corte correspondientes a este proceso, mientras que en la Figura 8.2 se

MEMORIA

muestra la división de la barra cilíndrica en las 4 probetas a obtener, así como, la utilización de contrapesos en la sujeción dicha barra.

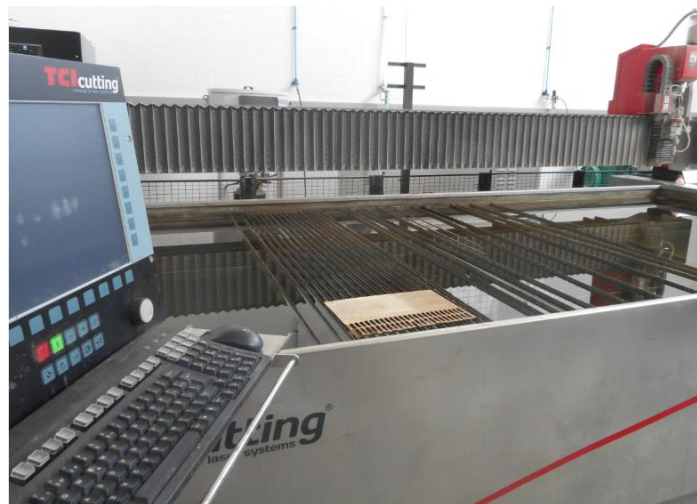


Figura 8.1. Sistema de corte waterjet TCI Cutting modelo BP-C 3020-1

Tabla 8.1. Parámetros empleados en el mecanizado de Ti6Al4V mediante AWJM

Presión	5000	bar
Caudal abrasivo	340	gr/min
Vel. Corte	50	mm/min
Tiempo de pausa	10	seg



Figura 8.2. Sujeción previa (izquierda) y mecanizado (derecha) de la barra de Ti6Al4V mediante AWJM

El acabado de las superficies mecanizadas se caracteriza por la aparición de rebabas en el contorno de estas, además de apreciarse una cierta coloración a rayas de esta superficie, consecuencia de la dispersión del chorro de agua (ver Figura 8.3 a)). Con el

MEMORIA

objeto de conseguir una mayor uniformidad de tales superficies se lleva a cabo la operación de refrentado, consistente en el mecanizado de las mismas mediante el empleo del torno horizontal modelo LC360B de la marca *HELLER®*. Usando este mismo equipo se realiza finalmente el cilindrado o avellanado, operación consistente en la realización de un orificio en estas superficies o caras planas de las probetas. Estos orificios servirán para introducir las probetas en las guías del cabezal y del contrapunto. Dado que de esta forma se consigue la sujeción de las probetas en los equipos posteriormente empleados, es relevante la alineación de tales orificios generados con el eje de la pieza para poder garantizar el correcto mecanizado sobre la misma. En la Figura 8.3 b) se muestra el acabado de una de estas caras planas, obtenido tras las operaciones de refrentado y cilindrado.

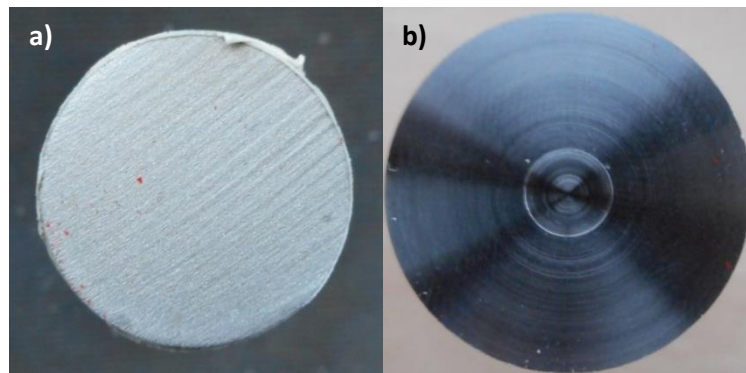


Figura 8.3. Comparación entre acabados, de la misma cara: a) tras mecanizado por AWJM y b) tras refrentado y avellanado.

8.1.2. Torneado

Previo rectificado de las probetas, estas son mecanizadas mediante el torno manual, de marca *ZUBAL®*, mostrado en la Figura 8.4. Con este equipo se realiza en primer lugar una pasada de desbaste a cada probeta, con objeto de eliminar posibles impurezas superficiales del material, seguida de una pasada de acabado cuyo resultado se pretende comparar con el obtenido de las operaciones de rectificado posteriores.

Para ambos procesos la herramienta empleada es de doble filo, sin recubrimiento y fabricada en carburo de wolframio enriquecido con cobalto. En cuanto al uso dado a la misma, se diferencia el empleo de una misma herramienta para el desbaste de todas las probetas, mientras que, en las operaciones de acabado, se emplea una herramienta por cada probeta. Con esto último se pretende que el acabado, previo a la rectificación, no se vea afectado por el desgaste de la herramienta en ningún caso.

MEMORIA

Respecto a la refrigeración, se destaca la ausencia de cualquier fluido de corte, es decir, se llevaron a cabo operaciones de torneado de titanio en seco. Acudiendo a bibliografía especializada en el estudio de este proceso para la aleación Ti6Al4V [29], se seleccionan los parámetros de corte a emplear. Considerando además el rango de velocidades a las que puede girar el cabezal, se cuantifican para cada operación dichos parámetros en los valores mostrados en la Tabla 8.2.

Una vez dispuesto el equipo, especialmente el portaherramientas y el cabezal, de las velocidades de avance y de giro, respectivamente, y siempre y cuando el equipo este apagado, se procede a la colocación de la probeta entre el cabezal y el contrapunto. Para ello se ajusta la distancia entre puntos necesaria, mediante el desplazamiento del contrapunto, cuya inmovilidad debe asegurarse una vez desplazado. En cuanto a la probeta, se prepara esta para su montaje en el equipo, mediante la sujeción de un perrillo de arrastre por uno de sus extremos. Como se observa en la Figura 8.5, se consigue tal montaje entre probeta y perrillo de arrastre, mediante el ajuste del tornillo dispuesto en uno de los extremos de este último.



Figura 8.4. Torno manual de marca ZUBAL® empleado en las operaciones previas al rectificado

Tabla 8.2. Parámetros de corte usados en las operaciones de torneado en seco de Ti6Al4V

	Desbaste	Acabado	Unidades
RPM del cabezal (N)	1200	588	rpm
Avance (A _v)	0,1	0,05	mm/r
Profundidad de corte (p)	0,2	0,5	mm

MEMORIA



Figura 8.5. Montaje de la pieza en el perrillo de arrastre

Otras medidas técnicas a realizar son:

- La limpieza, tanto del cabezal como del contrapunto, de posible suciedad, como por ejemplo, restos de viruta adheridos
- La alineación de la punta de la herramienta con el eje formado entre las puntas del cabezal y contrapunto. El modo de comprobación de tal alineación se muestra en la Figura 8.6.

El objetivo principal de estas últimas medidas es evitar posibles excentricidades, o desviaciones de forma, en el acabado de las probetas a rectificar posteriormente.



Figura 8.6. Alineación de la punta de la herramienta con el contrapunto

Llevado a cabo la preparación del equipo en función a la operación a realizar, desbaste o acabado, así como las medidas y comprobaciones relatadas, se coloca finalmente la probeta de la forma mostrada en la Figura 8.7.

MEMORIA



Figura 8.7. Ajuste de la probeta entre el cabezal y el contrapunto del torno

En cuanto al proceso de mecanizado se destaca la imposibilidad de realizar las operaciones, tanto de desbaste como de acabado, de una sola pasada. Esto es debido al propio diseño del cabezal, el cual limita el desplazamiento del portaherramientas hacia las proximidades de este. Así pues las operaciones se realizan en dos pasadas, una primera de mayor longitud y que soportará los ensayos de rectificado (Figura 8.8 a)), mientras que la segunda, de menor longitud (Figura 8.8 b)) corresponderá a la sección sin rectificar respecto a las que se comparan las sí rectificadas.

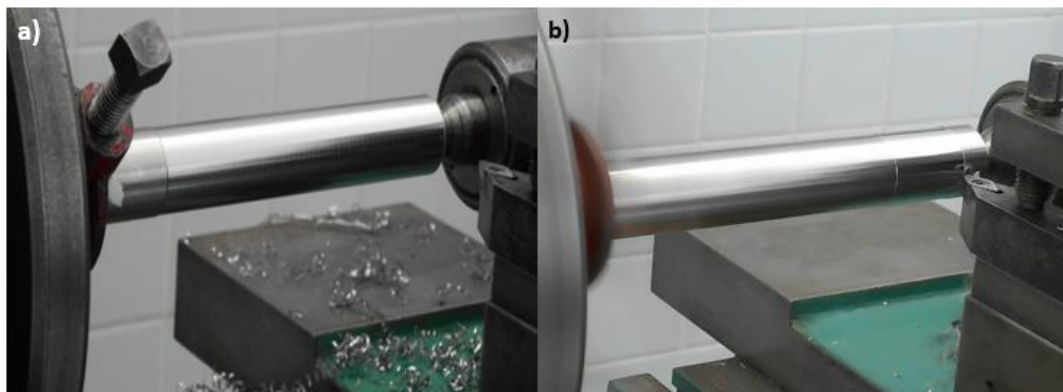


Figura 8.8. Diferenciación entre a) primer tramo y b) segundo tramo, mecanizados para una misma probeta

Dado que en el mecanizado del segundo tramo, representado en la Figura 8.8 b), la herramienta ya ha sido usada en el mecanizado del primer tramo (Figura 8.8 a)), la herramienta puede presentar cierto grado de desgaste previo a su empleo en el segundo tramo. Así pues se hizo uso del microscopio óptico estereoscópico (SOM) para analizar el estado de una herramienta tras el mecanizado del primer tramo. La Figura 8.9 permite comparar la cara de desprendimiento y filos, entre dicha herramienta empleada y una sin usar. El análisis de estas imágenes demuestra síntomas de adhesión y abrasión

MEMORIA

localizados en la cara de desprendimiento y filos respectivamente. Aunque este desgaste pueda afectar al acabado de la pieza en este tramo, no se considera suficientemente determinante pues el grado de desgaste mostrado no es demasiado abusivo.

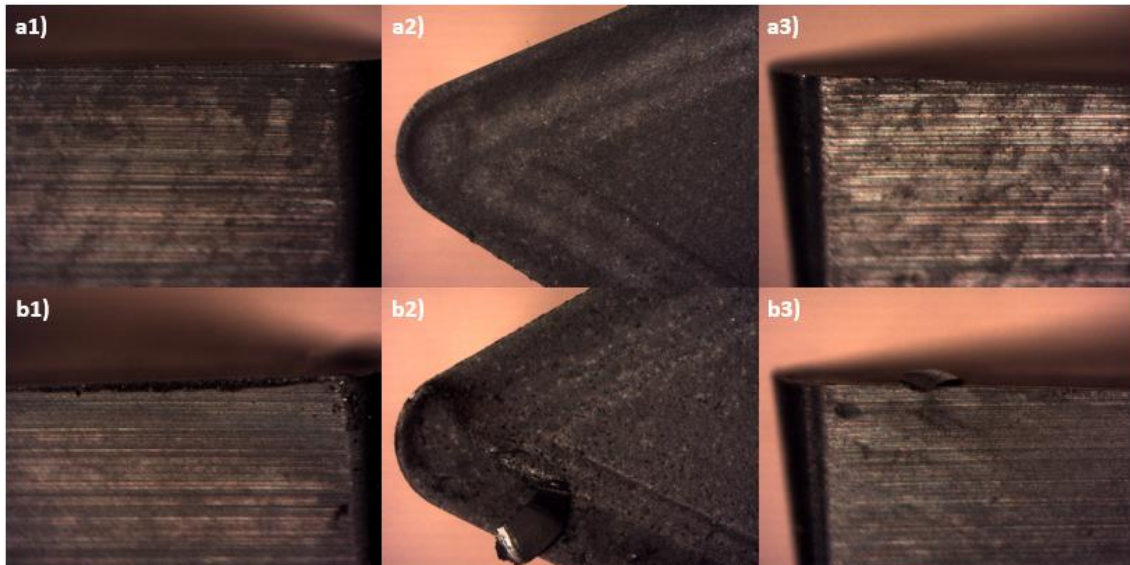


Figura 8.9. Cara de desprendimiento (2) y filos (1 y 3) de a) herramienta no usada y b) herramienta tras uso primer tramo. Zoom 3.0

8.1.3. Rectificado

El protocolo seguido desemboca finalmente en la realización de los ensayos mediante el empleo de la rectificadora cilíndrica RCE750 de *Heller*® mostrada en la Figura 8.10. Referente al equipo, la muela o disco de rectificado empleado es del fabricante *ATLANTIS*®, siendo su especificación 24C80K8V. Teniendo en cuenta la Figura 6.10, dicha especificación se traduce como:

- 24: tipo exacto del abrasivo usado por el fabricante. Información opcional.
- C: indica que el abrasivo es del grupo de los carburos de silicio (SiC).
- 80: indica que el tamaño de grano es de tipo fino.
- K: marca el grado de dureza del disco de rectificado, en este caso, blando.
- 8: indica que la estructura de la muela es abierta, es decir, la distancia entre los granos de abrasivo es relativamente grande.
- V: tipo de aglutinante, en este caso vitrificado.

Por otro lado, y en relación también al equipo, otro elemento de relevancia es el refrigerante empleado. La información asociada y preparación del sistema de refrigeración del equipo se desarrolla en la sección 8.1.1.1.

MEMORIA



Figura 8.10. Rectificadora cilíndrica RCE750

El encendido eléctrico del equipo se lleva a cabo girando en sentido horario la manilla de “Encendido/Apagado”, localizada en la parte derecha posterior del equipo. Se puede comprobar si el equipo está encendido simplemente observando si la bombilla “H21” del panel de operaciones eléctricas (Figura A. 4) está iluminada.

Antes de proceder con el rectificado de cada probeta, se realiza la conveniente operación de revestimiento o diamantado del disco o muela de abrasivo. El protocolo a seguir en esta operación se describe en la sección 8.1.1.2.

Una vez concluida esta operación, se procede a mover el cabezal hasta una posición que permita el espacio suficiente para la colocación entre puntos de las probetas. Esto se consigue aflojando los tornillos hexagonales encargados de sujetar dicho cabezal a la mesa de trabajo, los cuales se muestran en la Figura 8.11. Se debe asegurar de nuevo el anclaje del cabezal a la mesa de trabajo una vez desplazada la misma. Dado que todas las probetas se han diseñado con dimensiones equivalentes, la traslación del cabezal se ejecuta una sola vez previa realización de todos los ensayos.

Así mismo, se selecciona la velocidad de dicho cabezal antes de la colocación de cada probeta a rectificar. Esta operación consta en primer lugar de la disposición necesaria del sistema polea-correa (Figura 8.12) para conseguir la velocidad deseada, según el esquema representado en la Figura A. 3. Para lograr el ajuste de la correa se requiere desplazar el motor del cabezal (“3” de la Figura A. 1). Según la configuración escogida, se puede seleccionar entre las dos velocidades detalladas en el esquema de la Figura A. 3 mediante el botón “SA” del panel de control eléctrico del cabezal (ver Figura A. 3).

MEMORIA



Figura 8.11. Imagen en detalle de uno de los tornillos hexagonales que anclan el cabezal a la mesa de trabajo

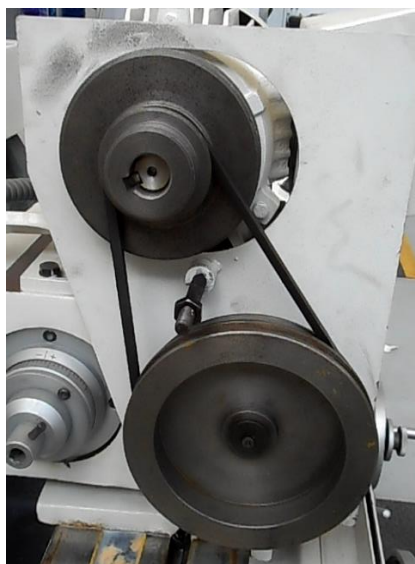


Figura 8.12. Sistema poleas-correa correspondiente al cabezal

Una vez se termina con el cabezal, se procede al montaje de la probeta en la rectificadora, empleando para ello el perrillo de arrastre, de igual forma que en las operaciones de torneado, vistas en el apartado 8.1.2. Para este caso también se debe asegurar que esté correctamente ajustado, al diámetro de la probeta, el tornillo del perrillo de arrastre (ver Figura 8.5).

La colocación de la probeta en la rectificadora se realiza ajustándola entre el cabezal y el contrapunto, con el perrillo de arrastre debidamente posicionado (ver Figura 8.13). Esto se consigue mediante el ajuste, a su vez, del contrapunto, existiendo dos formas para conseguirlo; girando la llave "10" o accionando el pedal "12" (ver Figura A. 1). Entre

MEMORIA

las dos formas, se aconseja seguir la primera a ser posible, pues de esta forma se puede prescindir del pedal, pudiéndose retirar hacia el interior y evitar así posibles incidentes causados por pisarlo accidentalmente.

Previa colocación de la probeta se debe limpiar tanto el cabezal como el contrapunto de la posible suciedad existente, como por ejemplo la viruta adherida procedente de mecanizados anteriores.

Una vez queda ajustada la pieza entre el cabezal y el contrapunto, tal y como se muestra en la Figura 8.13, es recomendable pulsar el botón de regulación de tensión "SB8" del panel de control eléctrico asociado al cabezal (Figura A. 3). De esta forma se lleva a cabo una prueba de trabajo la cual permite comprobar si la dirección de giro como la sujeción de la probeta son las adecuadas.

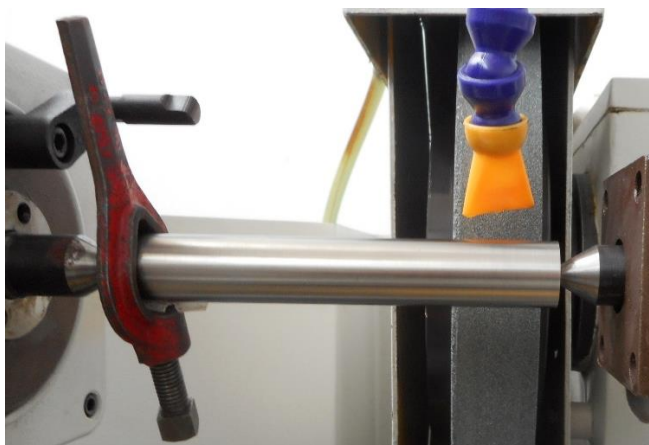


Figura 8.13. Colocación de la probeta entre el cabezal y el contrapunto.

Para cada probeta los tramos a rectificar son tres, cada uno de los cuales de una longitud igual al ancho de la muela; 35 mm, y de profundidades empleadas diferentes; 20, 40 y 80 μm . En cada una de ellas se deja un cuarto tramo sin rectificar de forma intencionada, con el objetivo de comparar el efecto del rectificado con el acabado obtenido de la operación de torneado previa. En cuanto a las velocidades de rotación de las probetas, cada una de ellas será rectificada a 60, 170, 230 y 460 r/min. Estos parámetros quedan recogidos en la Tabla 8.3, definiéndose a partir de estas los diferentes ensayos llevados a cabo.

Tabla 8.3. Parámetro de corte seleccionados

Velocidad pieza (V_w) [cte x probeta]	60	170	230	460	r/min
Profundidad (a_e) [cte x sección]	20	40	80		μm

MEMORIA

Estos ensayos son llevados a cabo tras la correcta colocación de la probeta a rectificar solo si se han llevado a cabo las medidas listadas a continuación:

- Comprobar si los niveles de refrigerante son suficientes para la duración completa de los ensayos, así como comprobar también que esté limpio.
- Revisar que la disposición y posición del sistema poleas-correa y botón "SA" (ver Figura A. 3) respectivamente, se correspondan a la velocidad buscada para el cabezal.
- Asegurarse de que la manilla de accionamiento/detención ("5" en la Figura A. 1) se encuentra en la posición de detención para evitar choques accidentales al arrancar la máquina. Por la misma razón, comprobar que el movimiento del cabezal este desactivado.
- Aún a pesar de no emplearse el desplazamiento automático de la mesa de trabajo durante el rectificado, se recomienda asegurar los fines de carrera mediante las garras "18" (ver Figura A. 1) para evitar posibles incidencias.
- Distanciar el disco de rectificado respecto de la probeta una distancia superior a 25 mm empleando para ello la manivela giratoria de avance cruzado del disco ("16" en la Figura A. 1). Además, el disco de rectificado no debe estar alineado con el cabezal o contrapunto, para prevenir así choques posibles cuando el cabezal se aproxime rápidamente. Esta precaución también debe garantizarse durante la ejecución de los ensayos.
- Una vez que se completen las acciones y comprobaciones que requieran de la manipulación de las probetas, y se vaya a proceder al arranque del equipo, principalmente del disco de rectificado, colocar la pantalla de metacrilato de la cual dispone el equipo.
- En caso de que el equipo haya permanecido inactivo durante un largo periodo de tiempo, arrancar inicialmente, tanto la mesa de trabajo como el disco de rectificado, a alta velocidad.

Tras haber realizado tales comprobaciones se procede a la realización de los ensayos, siendo el procedimiento seguido, para cada uno de estos, el descrito a continuación:

- a. Se activa la mesa de trabajo con el botón "SB4" del panel de controles eléctrico (Figura A. 4).
- b. Se inicia el giro del cabezal y accionamiento de la bomba de refrigeración mediante el botón "SB7". Además esta acción va acompañada del avance o acercamiento automático del disco de rectificado a la probeta siendo este hecho motivo del distanciamiento previo de la muela una distancia superior a 25 mm respecto a la probeta.

MEMORIA

- c. Se esperan unos segundo hasta poner en marcha el disco de rectificado, pulsando para ello el botón “SB2” y se deja estabilizar. Por precaución el operario debe encontrarse en una posición retirada cuando esta se active.
- d. Mediante el giro de la manivela “16” de la Figura A. 1, se consigue la aproximación del disco de rectificado a la probeta de forma manual. Este acercamiento debe llevarse a cabo hasta hacer contacto con la probeta, de la forma menos brusca posible. Dicho contacto se considerara además adecuado cuando se observe que el efecto de la muela sea uniforme en toda la sección de la probeta. Es entonces, a partir de esta profundidad, cuando se avanza tantos micrómetros en la escala de la rueda “15” (ver Figura A. 1) como profundidad corresponda al ensayo y se deja trabajar a tal profundidad durante unos segundos.

Es de suma importancia destacar la correcta refrigeración del proceso mediante la aplicación directa de taladrina sobre la superficie de contacto entre la pieza y la muela. Así mismo se debe tener especial cuidado en el mecanizado de las diferentes secciones, manteniendo un espacio de seguridad entre estas, así como, con los extremos de la probeta.

Una vez finalizado el ensayo se procede al retroceso manual del disco mediante dos vueltas de la manivela “16”, así como a la detención del movimiento del cabezal, flujo de refrigerante y movimiento del disco del rectificado (esperando en este último caso el tiempo suficiente para el correcto drenaje de refrigerante por parte del disco) pulsando para ello los botones “SB6”, “SB3” y “SB5 del panel de control eléctrico (ver Figura A. 4) respectivamente.

Ya completado este procedimiento, para el primer ensayo, se desplaza el disco frente a la siguiente sección de la probeta a rectificar mediante la traslación manual de la mesa de trabajo usando el volante “17” (ver Figura A. 1). Tras esta colocación se procede con activar en primer lugar la mesa de trabajo siguiendo todo el protocolo descrito para la realización de cada ensayo. Este proceso se repite hasta tres veces a lo largo de una probeta, adquiriendo está el aspecto mostrado en la Figura 8.14. Una vez finalizada la primera probeta se procede al rectificado de la siguiente comenzando por el cambio de velocidades, la sujeción del perrillo de arrastre y todo el proceso a continuación descrito en este apartado.

MEMORIA

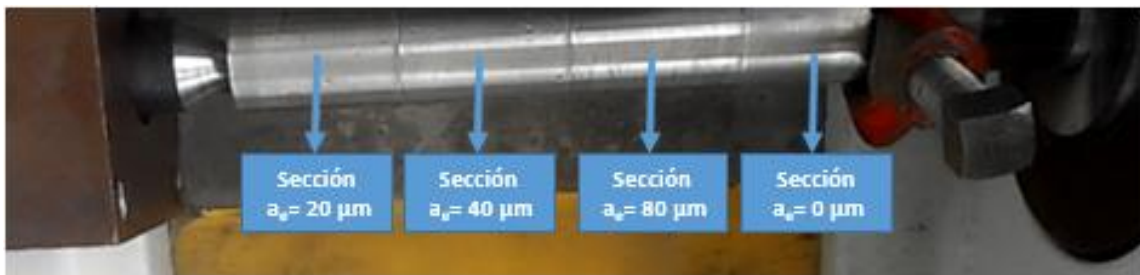


Figura 8.14. Representación final de las secciones rectificadas de la probeta

8.1.1.1 Preparación de la emulsión refrigerante

En las operaciones de rectificado es obligado el uso de fluidos de corte durante el proceso de mecanizado, aún más teniendo en cuenta que el material rectificado, el titanio, posee una conductividad térmica bastante baja (ver apartado 6.12). No obstante, se debe asegurar el correcto estado, así como, la cantidad suficiente de lubricante-refrigerante para las operaciones de rectificado a realizar. Teniendo esto en cuenta, en este punto se pasa a detallar el proceso seguido en este trabajo para la preparación de la refrigeración durante los ensayos.

En primer lugar, se vacía el depósito de refrigerante con el que se equipa la rectificadora. Este depósito realiza además la función de decantación del fluido de corte mediante su circulación a través de 4 cámaras en las que se divide el mismo. Con su vaciado se permite limpiar el fondo de los residuos o restos de viruta depositados. En la Figura 8.15, se pueden diferenciar las distintas cámaras de decantación además de apreciarse la suciedad del depósito una vez vaciado.

A continuación se procede a rellenar de nuevo el depósito del lubricante refrigerante, consistente en una emulsión de base agua y el fluido de corte MECAGREEN 450 AERO. Dicho fluido de corte distribuido por *CONDAT*®, además de ser hidrosoluble esta validado para su uso sobre aleaciones aeronáuticas de titanio [49].

La base de agua empleada se compone de hasta un 80% de agua destilada, siendo agua mineral el 20% restante. El motivo por el que la base no es completamente agua destilada es porque, de ser así, se generaría demasiada espuma, dificultando la comprobación visual del proceso, además que los minerales que contienen influyen en la suciedad y correspondiente mantenimiento de la emulsión y el tanque que la contiene.

MEMORIA



Figura 8.15. Depósito para el fluido de corte de la rectificadora RCE750

Tras verter 75 L de la base de agua en el depósito, se añade el lubricante refrigerante. Según las indicaciones del proveedor, este fluido se añade en una relación igual al 4% de la cantidad vertida de la base preparada, lo cual equivale a 3 L de dicho lubricante refrigerante.

Es conveniente realizarse la emulsión en este orden, primero la base de agua seguida del fluido de corte, pues en caso contrario la mezcla resultante no sería la adecuada. Para facilitar el mezclado se activa el sistema de refrigeración durante 5 minutos aproximadamente.

Finalmente se comprueban las concentraciones de agua y el lubricante refrigerante de la emulsión obtenida, mediante la ayuda de un refractómetro. Así pues, a partir de una sola gota de la mezcla, dicho instrumento nos informa sobre el porcentaje de taladrina presente en la emulsión. Este porcentaje al ser multiplicado por el coeficiente refractómetro de dicho fluido, igual a 1,6, debe resultar al 4% de concentración de este fluido en la mezcla.

8.1.1.2 Revestimiento o diamantado

De forma previa a la realización de los ensayos, relativos a cada probeta, se lleva a cabo el revestimiento o diamantado del disco de rectificado. Esta operación consiste en reavivar el grano de dicho disco mediante el empleo de un diamantador monopunta. Este debe fijarse, a través de tornillos adaptados, a la mesa de trabajo justo frente al disco a diamantar, tal y como se muestra en la Figura 8.16.

MEMORIA

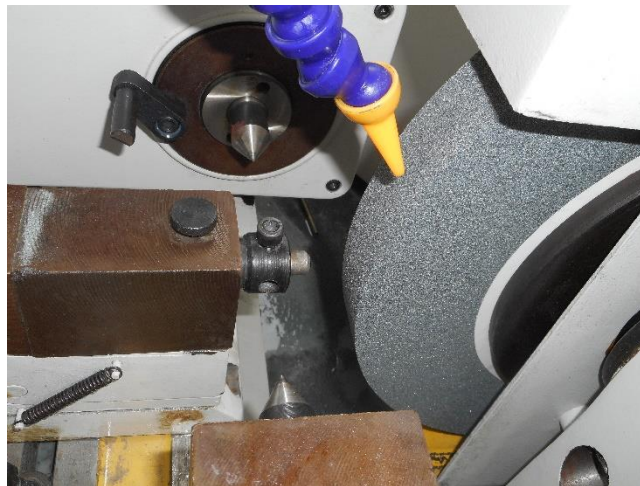


Figura 8.16. Colocación del diamantador monopunta respecto a disco de rectificado

Solo se podrá llevar a cabo esta operación siempre y cuando se tengan en cuenta las siguientes medidas de seguridad:

- Asegurar la correcta sujeción del diamantador a la mesa de trabajo
- Desactivación del movimiento del cabezal
- Mantener una distancia superior a los 25 mm entre el diamantador y el disco de rectificado

El diamantado se realiza transversalmente al ancho del disco de rectificado, para lo cual se activa el desplazamiento automático de la mesa de trabajo mediante la manivela de “Arranque/Parada” de la misma (“5” en Figura A. 1). La distancia que recorre el diamantador en este movimiento automatizado, se regula mediante el ajuste de las garras “18” (Figura A. 1) de tal forma que este recorra una distancia equivalente al ancho del disco. Es recomendable asegurar estos fines de carrera, no solo durante la operación de diamantado, sino también en el rectificado posterior con objeto de evitar posibles incidentes.

En cuanto a la incidencia del diamantador al disco, se aumentará aproximando este último a través de la manivela “16” (Figura A. 1). Este desplazamiento manual debe llevarse a cabo de la forma menos brusca posible; la profundidad de diamantado resultante debe ser inferior a 25 μm . Por supuesto, esta operación se debe ejecutar con el disco en movimiento, así como también, se debe evitar la aplicación de refrigeración durante cada pasada de diamantado siempre que sea posible.

Antes de finalizar, se debe señalar que uno de los motivos principales por los que se realiza el primer diamantado, justo antes de comenzar con la primera operación de rectificado, es corregir la defectología existente en el ancho de la muela a consecuencia

MEMORIA

de usos anteriores. No obstante, y aún a pesar de todas las medidas de seguridad relatadas, durante el diamantado previo de las operaciones de rectificado sobre la segunda probeta, la muela impactó con el cabezal. El incidente resultó en la craterización localizada en el contorno izquierdo de la muela, según se observa en la Figura 8.17. Esto llevo de nuevo a realizar sucesivas pasadas en orden de homogeneizar el ancho de la muela. Sin embargo, en las metodologías de medición descritas en los apartados 8.2.2, 8.2.3 y 8.2.4, se ha tenido en cuenta este incidente, de tal forma que altere lo menos posible los resultados a obtener.



Figura 8.17. Estado de la muela tras impacto recibido

8.2. Identificación de ensayos

Para la identificación de los ensayos realizados se ha establecido la siguiente nomenclatura, donde “x” es un valor numérico:

$$TiVw_xae_xG_xm_x$$

donde:

- Ti : se corresponde al material empleado, en este caso, titanio.
- Vw_x : corresponde a la velocidad de giro de cada probeta (ver Tabla 8.1)
- ae_x : corresponde a la profundidad empleada en el rectificado (ver Tabla 8.1) siendo “ ae_0 ” correspondiente a la sección de la probeta sin rectificar.
- G_x : generatrices en las que se divide el cilindro para su análisis (ver Figura 8.19 y Figura 8.26).
- m_x : medición realizada en cada generatriz. El valor tomado por “x” en sentido ascendente (“ m_1 ”, “ m_2 ”, “ m_3 ”) se corresponde a su posición, de izquierda a derecha, a lo largo de la generatriz.

MEMORIA

En el caso de la evaluación de la macrogeometría de la pieza, la metodología de medición, concretamente las generatrices, son las determinadas por el software. Así pues en este caso la nomenclatura se simplifica como:

$$TiVw\text{aex}$$

siendo

- Ti : se corresponde al material empleado.
- $Vw\text{x}$: corresponde a la velocidad de giro de cada probeta (ver Tabla 8.1)
- aex : corresponde a la profundidad empleada en el rectificado (ver Tabla 8.1) siendo “ae0” correspondiente a la sección de la probeta sin rectificar.

8.3. Metrología

Conseguidos los ensayos, se procede al estudio de las operaciones de rectificado realizadas, mediante la evaluación metrológica de aspectos microgeométricos, macrogeométricos, así como la microdureza, correspondientes a cada ensayo. Cabe destacarse que, en las diferentes metodologías a describir en este apartado, se tuvo especial cuidado en el manejo de las diferentes probetas, ya que cualquier pequeño defecto superficial puede desvirtuar las medidas tomadas.

8.3.1. Microgeometría

La primera evaluación llevada a cabo fue la de la microgeometría, siendo concretamente la rugosidad superficial, la propiedad evaluada. Para el análisis de esta propiedad se obtuvieron diferentes perfiles de rugosidad y valores de los parámetros asociados. Todo este proceso se realiza en el laboratorio de metrología de la Universidad de Cádiz empleando el rugosímetro *Mahr Perthometer PGK 120* (Figura 8.18) localizado en dicho laboratorio. El modelo de palpador usado es un MFW 25, el cual posee un radio de punta de 2 μm y un ángulo de 90°.

En un primer momento, se señalizan, sobre una de las caras planas de la probeta, 4 generatrices tal y como se muestran en la Figura 8.19. Posteriormente, se coloca la probeta sobre la base del rugosímetro mediante el empleo de soportes y se alinea el palpador con las generatrices realizadas, tal y como se aprecia en la Figura 8.20.

MEMORIA



Figura 8.18. Equipo Mahr Perthometer PGK 120



Figura 8.19. Disposición de las cuatro generatrices del cilindro

MEMORIA



Figura 8.20. Realización de una medida de rugosidad sobre una de las probetas

A lo largo de cada una de estas generatrices se realizara 1 medición por sección. De esta forma se busca analizar la uniformidad de rugosidad en toda la sección evaluada. Debe mantenerse un cierto margen de seguridad en la realización de la medida, protegiendo que el palpador no quede muy cerca de los extremos, así como, de evitar la defectología de la muela (ver Figura 8.17).

Cabe destacarse la realización de dos medidas en la generatriz “G1” de cada sección rectificada. Estas se llevaron a cabo en los bordes de la sección comprobando así que, en todas las probetas, la sección rectificada a $20\text{ }\mu\text{m}$ presentaba un diferenciado alto valor del parámetro R_a en la región mecanizada por la sospechada defectología de la muela. Así pues estos resultado se tomaron como muestra de la defectología real de la muela, a evitar en la toma de medidas y resultados consecuentes.

Para la realización de estas mediciones se escoge una longitud básica de muestreo, o *cut-off* (λ_c), igual a $0,8\text{ mm}$ en 7 medidas. Esto supone una distancia total de $5,6\text{ mm}$ a recorrer por el palpador, siendo únicamente válidos para la medición 4 mm , resultado del descarte de la primera y última medida por parte del software. De esta forma se obtiene el perfil de rugosidad (R), el perfil primario (P) y el perfil de ondulación (W) y los valores de R_a , R_z , R_q , R_p y R_{sm} de las cuatro generatrices de la probeta (sólo el valor de R_a va a ser utilizado en el análisis). Los informes con los diferentes perfiles y valores de los parámetros comentados, correspondientes a cada ensayo, aparecen recogidos en el ANEXO VII.

La razón de emplear el mismo *cut-off* para todas las secciones y ensayos, es la posibilidad de poder comparar en iguales condiciones la rugosidad resultante de cada

MEMORIA

uno. No obstante, se considera la normativa aplicable, extrayéndose de la misma la Tabla 8.4 [50]. Considerando los valores de R_a obtenidos para cada ensayo (ver ANEXO VII), se concluye además que, el *cut-off* seleccionado, está dentro de norma.

Tabla 8.4. Relación entre los valores de R_a y λ_c para que el resultado obtenido esté dentro de norma [50]

Perfil R_a (μm)	Longitud básica de muestreo (λ_c) (mm)	Longitud de evaluación (l_n) (mm)
$0,006 < R_a \leq 0,02$	0,08	0,4
$0,02 < R_a \leq 0,1$	0,25	1,25
$0,1 < R_a \leq 2$	0,8	4
$2 < R_a \leq 10$	2,5	12,5
$10 < R_a \leq 80$	8	40

8.3.2. Macrogeometría

La macrogeometría o forma de cada una de las probetas es evaluada en base a la redondez, cilíndricidad y rectitud de las mismas. Estas mediciones son llevadas a cabo mediante la medidora de forma *Mahr Formtester MMQ44* (ver Figura 8.21) localizada, al igual que el rugosímetro, en el laboratorio de metrología de la Universidad de Cádiz.



Figura 8.21. Medidora de forma Mahr Formtester MMQ44

Una vez la probeta se sujeta manualmente a la base del equipo mediante el empleo de la garra con la que se incorpora esta (ver Figura 8.22), se procede a corregir los errores de centrado y nivelado de la misma. Para ello la medidora posee un software específico

MEMORIA

que indica tras cada ciclo de centrado o nivelado las correcciones a aplicar. Una de las fases de este proceso puede verse en la Figura 8.23.

Cada ciclo de centrado se realiza siguiendo una trayectoria circular, mientras que para el nivelado se necesitan dos circunferencias; una en la base y otra más arriba, y comprobar la pendiente existente entre ambas. Una vez que la excentricidad obtenida se encuentra por debajo del valor máximo, establecido en 0,0050 mm, el software deja de hacer comprobaciones y es entonces cuando se pueden realizar las diferentes mediciones.

Cabe destacarse además la ejecución de ambas operaciones, centrado y nivelado, en las secciones sin rectificar de cada probeta, tal y como se muestra en la Figura 8.22. Durante este proceso se tuvo también en cuenta que el palpador no estuviera próximo a los bordes de la sección ni a la huella superficial provocada por el ajuste del tornillo del perrillo de arrastre.

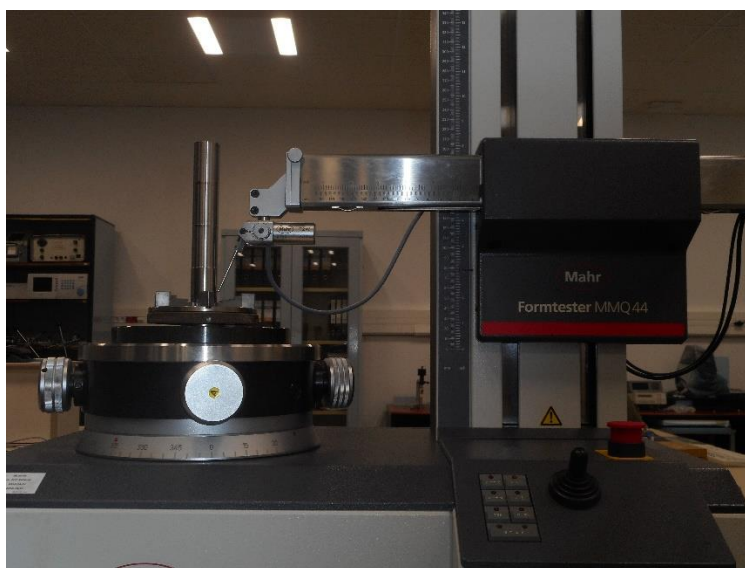


Figura 8.22. Proceso de centrado y nivelado de la probeta sobre la sección sin rectificar

Tanto para la redondez como para la cilindridad se llevaron a cabo 5 medidas a lo largo de 30 mm de cada sección rectificada. Por cada una de estas mediciones el palpador describe una trayectoria circular sobre la superficie de cada sección, y una vez que la finaliza sube 7,5 mm para realizar la siguiente medición. Parte de este proceso puede observarse en la Figura 8.24.

MEMORIA

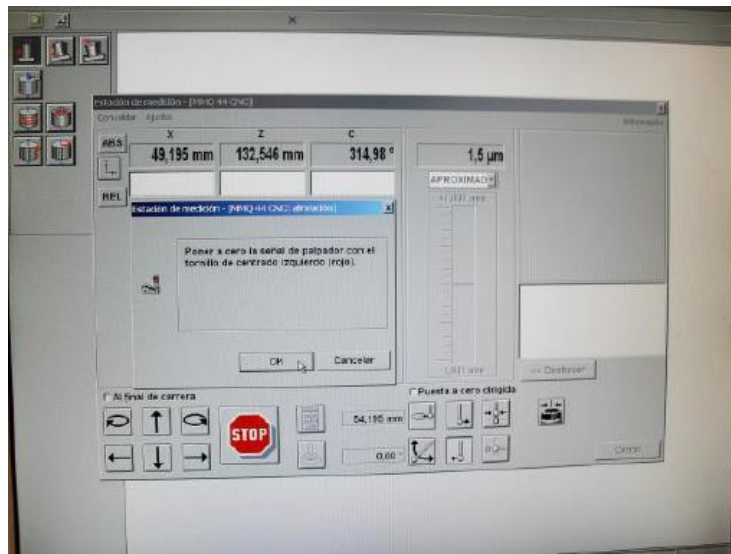


Figura 8.23. Extracto de uno de los pasos seguidos por el software del equipo para el centrado de la probeta

Para la medición de la rectitud también se emplean 5 mediciones a lo largo de 30 mm de cada sección rectificada. La diferencia respecto a las mediciones de redondez y cilindridad se encuentra en el procedimiento; para cada medición el palpador describe una generatriz a lo largo de estos 30 mm, girando la probeta 72° desde su base para que el palpador realice la generatriz siguiente.

Se puede observar que las mediciones abarcan tan solo 30 mm en lugar de extenderse a los 35 mm con los que se cubrirían todo el ancho de rectificado. El motivo de esto es prevenir la proximidad del palpador a los extremos de la sección, evitando así la posible defectología causada por el incidente con la muela (ver Figura 8.17).

Respecto a las secciones sin rectificar, también se realizan mediciones de redondez, cilindridad y rectitud. Sin embargo, la diferencia entre el ancho de estas secciones y las rectificadas, han llevado a ajustar la longitud de medición a las mismas. No obstante, como se considerará en el centrado y nivelado, se ha ajustado esta longitud a modo de prevenir también el acercamiento del palpador a los extremos de la sección, así como, a la huella causada por el montaje entre probeta y perrillo de arrastre.

MEMORIA

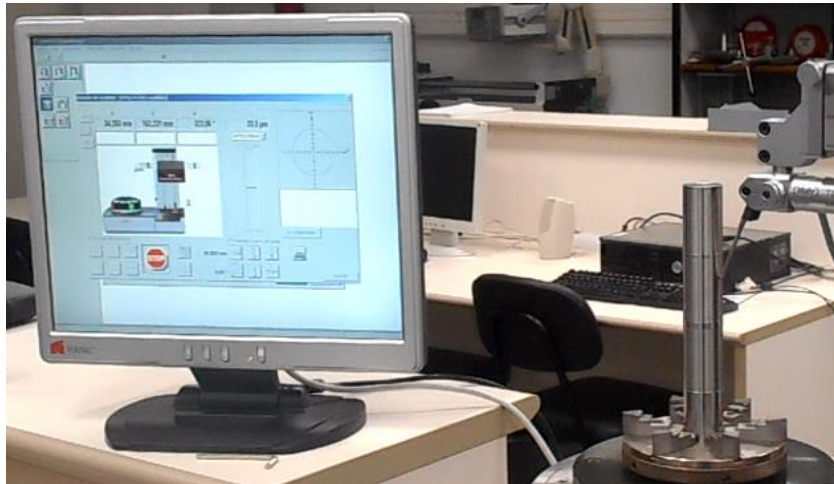


Figura 8.24. Estado de la probeta y el palpador de forma durante una de las mediciones de redondez y cilíndricidad.

8.3.3. Microdureza

Finalmente, y únicamente tras la consecución óptima de los anteriores procesos de medición, se procede a la evaluación de la microdureza Vickers para cada ensayo. El motivo de ser la última metodología de medición en llevarse a cabo se encuentra en las naturalezas contrapuestas de cada método de medición; la huella generada por el indentador, podría afectar a las medidas de rugosidad y de forma, al depender estas de la sensibilidad del palpador que recorre la superficie de la probeta. Para la medición de esta propiedad físico-química, el equipo empleado es el microdurómetro modelo HMV-2ADW de la marca *SHIMADZU*®, el cual se muestra en la Figura 8.25.



Figura 8.25. Microdurómetro modelo HMV-2ADW de marca SHIMADZU® empleado

Como ya se hiciera en la medición de la rugosidad, se señalizan, sobre una de las caras planas de la probeta, las generatrices a lo largo de las cuáles se realizarán las

MEMORIA

mediciones. En este caso sin embargo se consideran solo 3 generatrices, equiespaciadas tal y como se muestra en la Figura 8.26. Tras esto se coloca la probeta sobre la base del rugosímetro empleando para ello un soporte capaz de mantenerla estable durante la indentación. El soporte y colocación de la probeta durante los ensayos se muestra en la Figura 8.27.

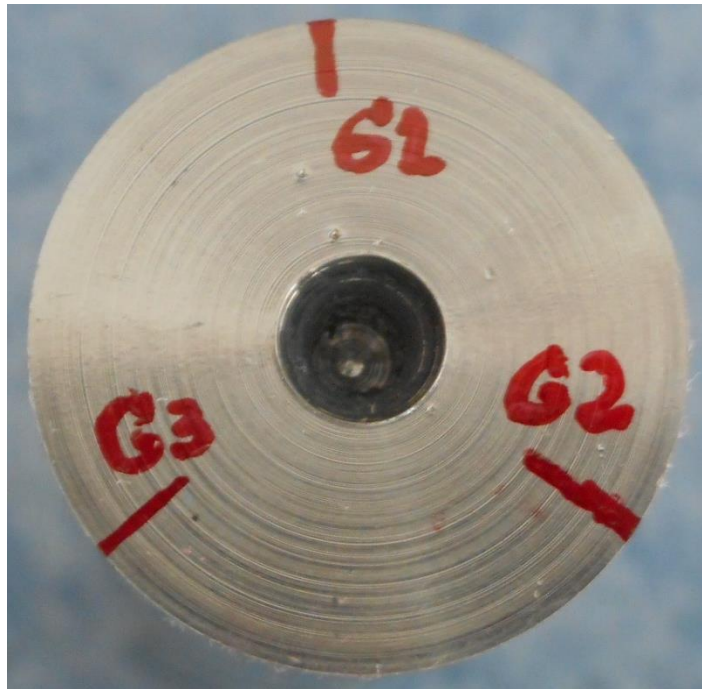


Figura 8.26. Disposición de las tres generatrices del cilindro

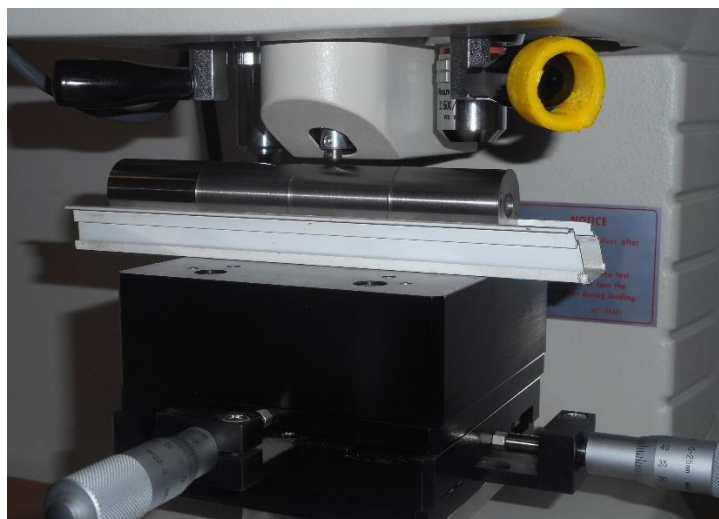


Figura 8.27. Realización de una medida de microdureza Vickers sobre una de las probetas

MEMORIA

A lo largo de cada una de estas generatrices se realizarán, comenzando por el extremo izquierdo, hasta 2 mediciones por sección suficientemente equiespaciadas. Con objeto de evitar la posible defectología de la muela (ver Figura 8.17) se guarda, como ya se hiciera en las metodologías aplicadas anteriormente, cierto distanciamiento respecto a los límites de la sección.

Un aspecto importante relativo a la medición de microdureza mediante el método Vickers, es la fuerza con la que incide el indentador. El valor escogido para esta fuerza es el mínimo valor definido por la norma para la medición de microdureza; 0,9807 N. De esta forma se asegura que la huella generada es lo suficientemente pequeña, lo cual favorece a la medición de esta mediante el método Vickers.

Este no es el único problema a tener en cuenta en la realización de tales mediciones, pues como ya se viera en el apartado 7.3, el método Vickers permite evaluar la microdureza sobre una superficie plana, en el caso estudiado se está aplicando este método sobre superficies curvas. Dado que dicho método depende de la longitud de las diagonales de la huella generada por el indentador (ver (7.5)), si este último incide en la generatriz más próxima a este, la única diagonal de la huella deformada por la curvatura es la transversal a la generatriz. Así pues en la colocación de la probeta (ver Figura 8.27) se ha requerido de la alineación de la punta del indentador con la generatriz más alta del cilindro, coincidiendo esta con una de las tres generatrices señaladas en la Figura 8.26.

Las huellas obtenidas de esta forma, ejemplos de las cuales se muestran en la Figura 8.28, presenta bastante similitud respecto a la estandarizada por la norma [44, 45] (ver Figura 7.6). Por otro lado, a pesar de la ya comentada deformación de la huella debida a la curvatura, si se considera que, respecto a las dimensiones del cilindro, las de la huella son de un orden 1000 veces inferior, el error en el valor de microdureza obtenido se puede asumir como despreciable. Aun considerando este error, los valores obtenidos mediante esta huella permiten una evaluación al menos cualitativa de la influencia de los diferentes ensayos realizados sobre la microdureza de la pieza.

MEMORIA

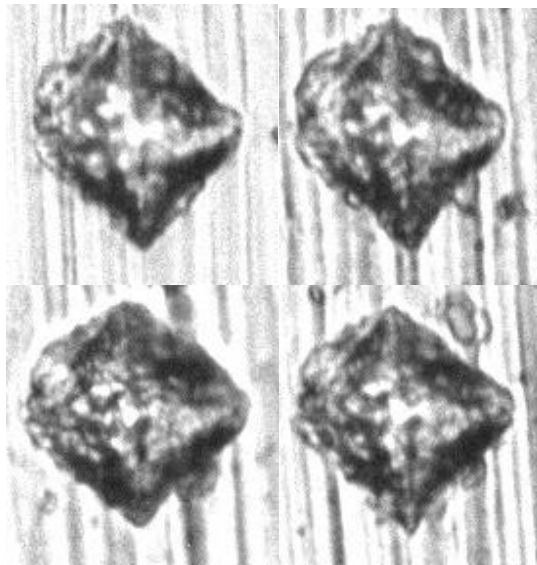


Figura 8.28. Ejemplos de huellas obtenidas para la medición de la microdureza empleando el método Vickers

Capítulo 9

9. Resultados y discusión

En este capítulo se exponen y se discuten los resultados obtenidos de rugosidad media aritmética (R_a), redondez, cilindridad, rectitud y microdureza tras la consecución del proceso experimental descrito en el anterior capítulo. Estos serán tratados estadísticamente para cada ensayo así como serán representados en graficas que faciliten la discusión de los mismos. De esta forma se pretende evaluar cómo influye el proceso experimental desarrollado en la micro y macrogeometría, así como, microdureza, de las probetas de titanio.

Los informes obtenidos con los valores medidos para cada propiedad así como la recopilación de los mismos en tablas, se pueden consultar en el ANEXO VII, ANEXO VIII y ANEXO IX.

9.1. Resultados de microgeometría

La microgeometría es evaluada según los valores de la rugosidad media aritmética (R_a) debido al uso extendido de este parámetro en el estudio de la rugosidad superficial (7.1). El conjunto de valores de este parámetro obtenidos para cada ensayo, es representado en las expuestas al principio del ANEXO VII.

En orden de optimizar el análisis, se ha optado por calcular el valor promedio de R_a para cada ensayo, o lo que es igual, cada combinación de velocidad de rotación de la pieza (V_w) y profundidad (a_e) empleadas en cada operación. Así mismo, junto con este valor medio, se ha obtenido la desviación típica, una medida que cuantifica la dispersión de los valores dentro de un intervalo. Ambos valores son expuestos en la Tabla 9.1.

Tabla 9.1. Valores medios de R_a y su desviación típica

Vel. Rotación (V_w) [r/min]	Profundidad (a_e) [μm]	\bar{R}_a [μm]	Desv. Típica [μm]
60	0	0,53	0,05
	20	0,39	0,11
	40	0,35	0,04
	80	0,34	0,03
170	0	0,52	0,06
	20	0,83	0,23

MEMORIA

	40	0,21	0,03
	80	0,27	0,02
230	0	0,44	0,05
	20	0,29	0,16
	40	0,20	0,04
	80	0,23	0,03
460	0	0,60	0,11
	20	0,45	0,11
	40	0,57	0,03
	80	0,85	0,06

A partir de estos valores medios y desviaciones típicas se obtienen las gráficas mostradas en la Figura 9.1, las cuales comparan la rugosidad, según R_a , con la profundidad de mecanizado (a_e) para cada velocidad de rotación de las piezas (V_w).

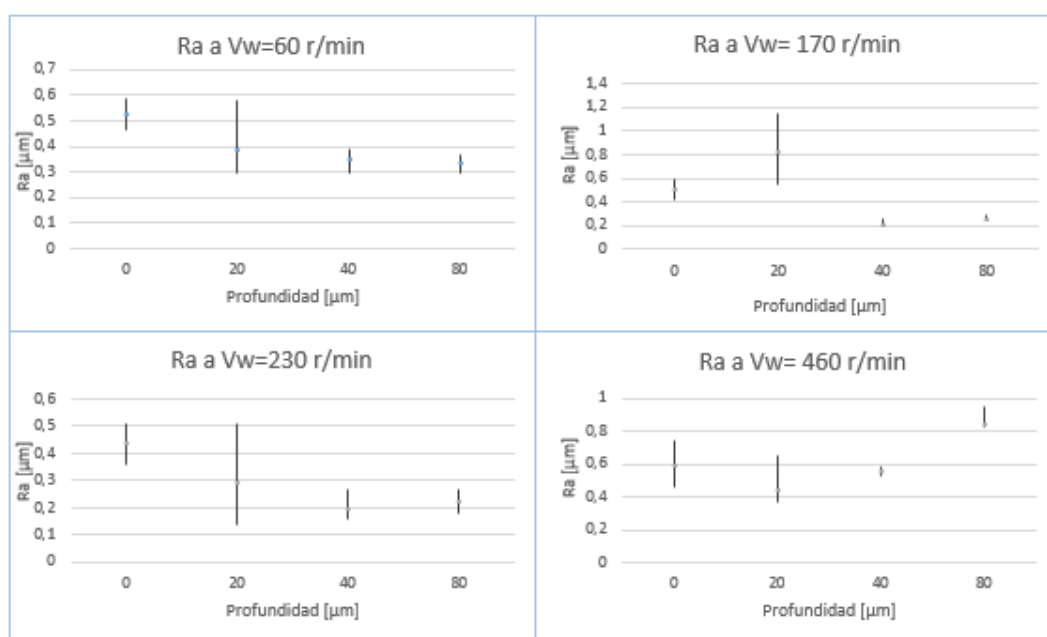


Figura 9.1. Valores de R_a en función de la profundidad a_e , para cada velocidad V_w

Analizando los valores de desviación típica calculados y recogidos en la Tabla 9.1 y la Figura 9.1, se observa que, independientemente de la velocidad de rectificado (V_w), a medida que se aumenta la profundidad en esta operación (a_e) tal medida de la dispersión se reduce, es decir, las mediciones son más similares cuanto mayor es dicha profundidad. Realizando ahora el análisis de la desviación típica según la velocidad de rotación de la pieza (V_w) (ver gráficas de la Figura 9.2) la dispersión de los valores apenas

MEMORIA

parece verse influida por la velocidad, al menos con una tendencia tan clara como la observada con la profundidad. En cambio estas gráficas si permiten destacar como, entre los ensayos con mayor desviación típica – los realizados a profundidad (a_e) igual a 20 μm – es el realizado a una velocidad de 170 r/min el que presenta una mayor dispersión de los valores medidos.

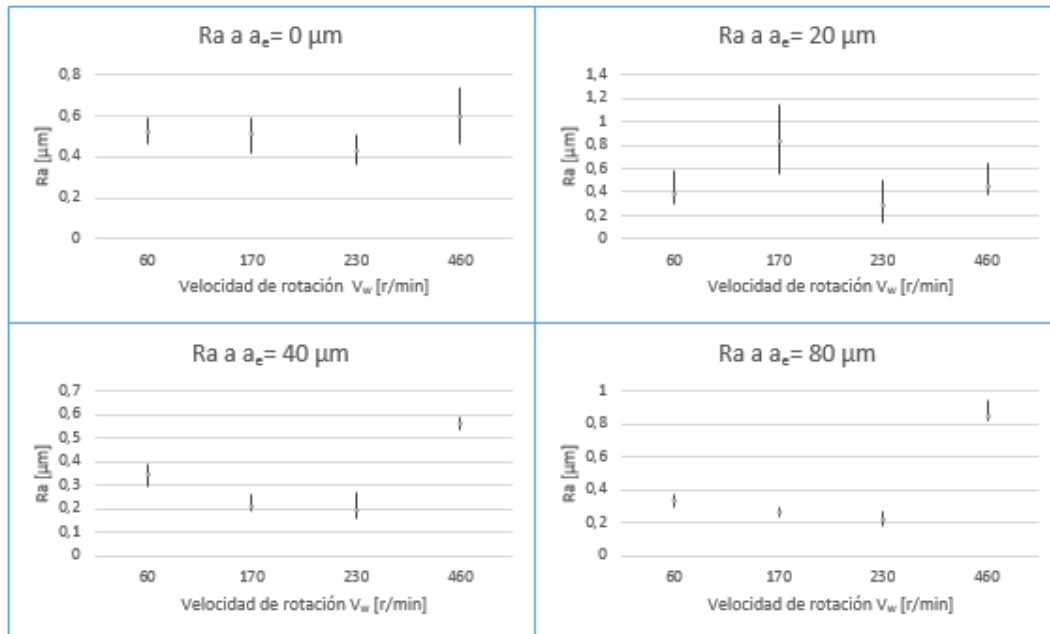


Figura 9.2 Valores de Ra en función de la velocidad V_w , para cada profundidad a_e

Considerando además la metodología experimental aplicada, descrita en la apartado 8.2.2, se puede interpretar a la desviación típica como un indicador de la uniformidad del acabado obtenido en todo el ancho de la sección rectificada o torneada en cada caso. Así pues se entiende que, mediante el rectificado, se puede conseguir una mayor uniformidad de la rugosidad en la superficie de la probeta, cuanto mayor sea la profundidad de mecanizado (a_e) empleada. Según tal interpretación, la llamativa dispersión de los valores medidos en las secciones rectificadas a 20 μm – en la mayoría de los casos superiores a la obtenida en secciones solo torneadas – puede ser síntoma de la posible defectología del disco de rectificado, consecuencia del incidente descrito en la sección 8.1.1.2 (ver Figura 8.17). Probablemente tal defectología puede haber dificultado el mecanizado de forma homogénea por aquella zona afectada del disco.

Aunque a partir de la Figura 9.1 y Figura 9.2 se puede analizar así mismo como influyen la profundidad (a_e) y velocidad de rotación (V_w), respectivamente, en el valor promedio de Ra, se opta por la obtención de las gráficas mostradas en la Figura 9.3 y Figura 9.4. Estas facilitan el análisis al poderse comparar en una misma gráfica la evolución según profundidad o velocidad constante mediante el empleo de líneas de tendencia. Estas

MEMORIA

últimas han sido adaptadas mediante funciones polinómicas de orden 2 pues es la que mejor se ajusta a la mayoría de series de datos, pudiéndose comparar de esta forma las tendencias correspondientes, bien a cada velocidad o profundidad seleccionada, según el caso.

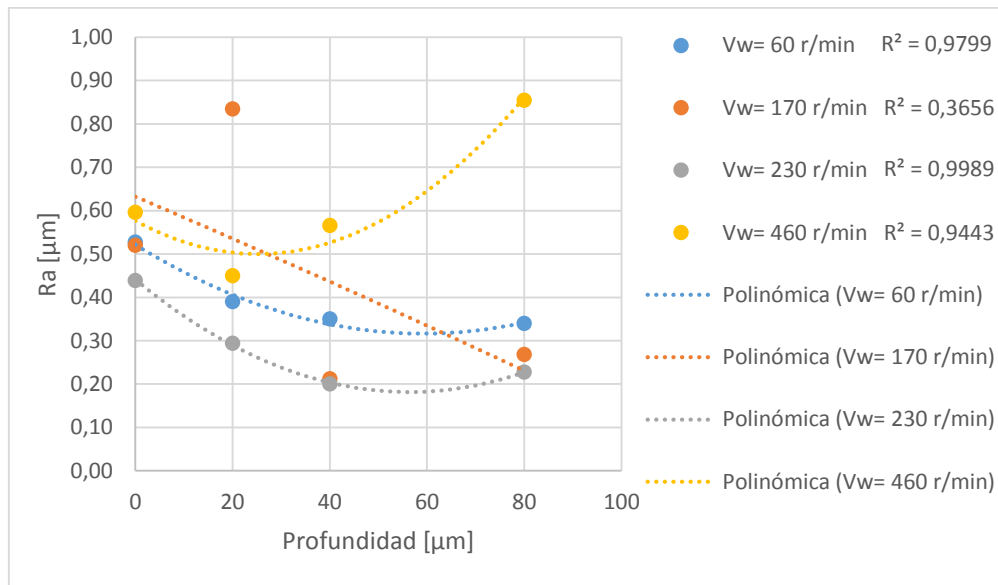


Figura 9.3. Comparación entre las evoluciones de Ra con la profundidad a_e para cada velocidad V_w

En primer lugar, la Figura 9.3 representa la variación del parámetro Ra en función de la profundidad (a_e) para cada velocidad de rotación de la probeta (V_w). Se puede observar cómo, de forma general, la rugosidad en los casos rectificados es menor. Así mismo esta mejora de la calidad superficial, respecto a la superficie solo torneada, se ve optimizada a valores de la profundidad (a_e) próximos a los 40 μm para las velocidades de 60, 170 y 230 r/min, mientras que a velocidades de 460 r/min el mejor acabado se consigue a la profundidad (a_e) de 20 μm .

Por otro lado, la Figura 9.4 representa la variación de este parámetro Ra en función de la velocidad de rotación de la probeta (V_w), para cada profundidad (a_e) empleada. En este caso la primera serie de datos, asociada a la profundidad $a_e = 0 \mu\text{m}$, se corresponde a los valores de Ra obtenidos para el tramo sin rectificar, lo que permite evaluar la calidad superficial obtenida, solo con el proceso de torneado en seco, respecto a las correspondientes a cada operación de rectificado llevada a cabo. Teniendo esto en cuenta, se observa, como ya se hiciera a través de la Figura 9.3, la tendencia a mejorarse la calidad superficial con el rectificado. No obstante, esta mejora parece alcanzar una cota máxima a la velocidad de 230 r/min, pues con el doble de esta velocidad la rugosidad aumenta considerablemente. Este amplio incremento de Ra a la velocidad de

MEMORIA

460 r/min, llega incluso a superar ampliamente a los obtenidos con solo el torneado, como ocurre en el caso concreto de emplear una profundidad (a_e) de 80 μm con esta velocidad.

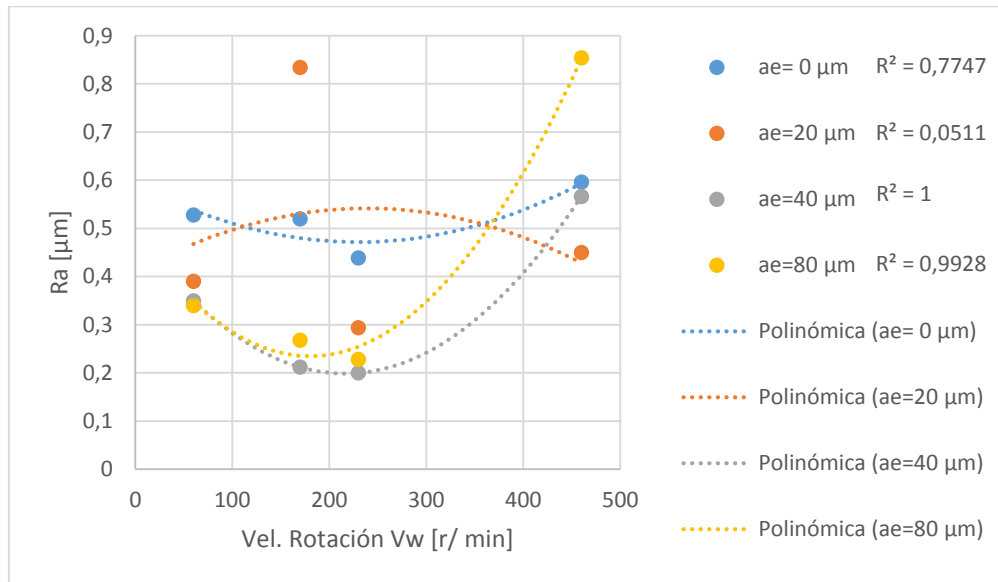


Figura 9.4. Comparación entre las evoluciones de R_a con la velocidad V_w para cada profundidad a_e

No obstante, llama en gran medida la atención, el pronunciado valor de R_a obtenido para el ensayo de rectificado realizado a 20 μm de profundidad (a_e) y 170 r/min de velocidad de rotación (V_w). Tal valor de rugosidad llega incluso a ser ampliamente superior al obtenido con solo la operación de torneado en seco. Comparando con el resto de tendencias mostradas tanto en la Figura 9.3 como Figura 9.4, este valor parece, a priori, no tener coherencia.

En orden de contrastar este resultado se acude a cierta bibliografía [51] en la que, para una profundidad (a_e) de en torno 20–25 μm y velocidad de rotación de la pieza (V_w) de 170 r/min, se recoge un valor de R_a aproximado a 0,45 μm . Esto conduce a considerar que han surgido variaciones en las condiciones del ensayo realizado con estos parámetros, llegando a afectar negativamente a la calidad superficial de la sección correspondiente. Así pues, tal y como se aprecia en la Figura 9.5 – donde se han obtenido mediante la técnica SOM imágenes de las diferentes secciones rectificadas a 20 μm – la imagen correspondiente a este ensayo con velocidad de rotación (V_w) 170 r/min, presenta una superficie menos alisada al destacarse lo que, en primera instancia, parece material o virutas adheridas a la superficie de la pieza. Este fenómeno es generalmente debidos a altas temperaturas alcanzadas, por lo cual, se inclina la causa

MEMORIA

de esta pobre calidad superficial a la posible refrigeración ineficaz durante el ensayo (ver apartados 6.4, 6.12, 6.14.3 o Figura 6.28)

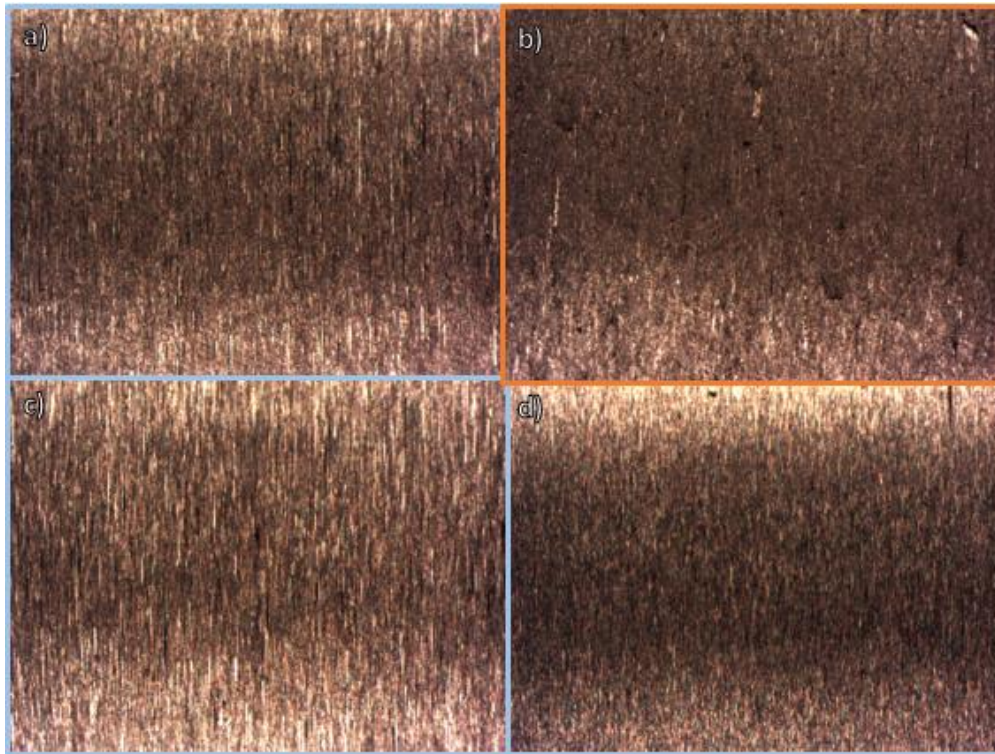


Figura 9.5. Acabado obtenido en las secciones rectificadas a $a_e = 20 \mu\text{m}$ para; a) $V_w = 60 \text{ r/min}$, b) $V_w = 170 \text{ r/min}$, c) $V_w = 230 \text{ r/min}$ y d) $V_w = 460 \text{ r/min}$. Zoom 3.0

Considerando el valor de Ra extraído de [51] sobre las gráficas de la Figura 9.3 y Figura 9.4 (punto señalado mediante flecha de color verde en gráficas de la Figura 9.6), se observa una tendencia similar al resto de series, es decir, Ra parece disminuir con la profundidad. Con esta sustitución se mantiene así mismo, el valor mínimo de Ra con la profundidad de $40 \mu\text{m}$ para la velocidad de 170 r/min . Por otro lado la evaluación de Ra en función de la velocidad de rotación (V_w) para la profundidad $a_e = 20 \mu\text{m}$ demuestra la estabilidad de este valor con la velocidad.

Así pues, en base al análisis de las Figura 9.1, Figura 9.2 y Figura 9.6 se puede concluir que mediante el rectificado se consigue mejorar la calidad superficial, justificando su uso en piezas en las que tal acabado requiere de altas exigencias. Esta mejora se observa tanto mejor cuanto mayor es la profundidad, a velocidades inferiores a 460 r/min . No obstante, a una profundidad de $80 \mu\text{m}$, aunque proporcione una rugosidad más uniforme, la calidad superficial parece empeorar respecto a los casos anteriores, siendo valores próximos a $40 \mu\text{m}$ – o $20 \mu\text{m}$ en el caso particular de 460 r/min – los que consiguen una mayor optimización del rectificado en este sentido. La influencia de la

MEMORIA

velocidad de rotación de la pieza (V_w) sobre la rugosidad superficial parece ser bastante similar a la comentada para la profundidad (a_e); a mayor velocidad la calidad superficial mejora hasta velocidades de 230 r/min, pues esta empeora en gran medida a 460 r/min. El resultado tan adverso de los altos valores de velocidad y profundidad comentados ($V_w = 460$ r/min & $a_e = 80$ μm) llega a convertir el proceso de rectificado en contraproducente una vez se combinan ambos parámetros, dado que la calidad superficial obtenida es ampliamente inferior respecto a la correspondiente al torneado en seco.

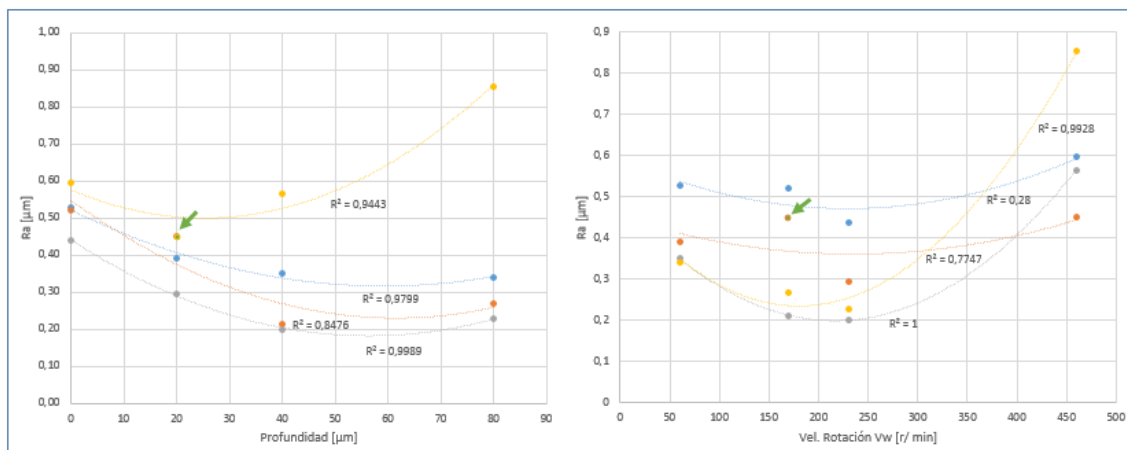


Figura 9.6. Consideración del valor de R_a obtenido de [51] para $a_e = 20$ μm y $V_w = 170$ r/min en las comparativas de Figura 9.3 y Figura 9.4.

9.2. Resultados de macrogeometría

Una vez analizados los resultados obtenidos en la evaluación microgeométrica, se exponen y analizan de forma similar los resultados obtenidos en la evaluación de las desviaciones dimensionales. Al igual que en el apartado anterior, el conjunto de resultados de redondez, cilíndricidad y rectitud, correspondientes a cada ensayo, se recogen en las tabla recogida al comienzo del ANEXO VIII.

Análisis de la redondez

Al igual que para la rugosidad, en orden de facilitar el análisis se ha calculado un valor medio así como la desviación típica de los resultados de redondez. Estos son recogidos en la Tabla 9.2 mostrada a continuación.

Tabla 9.2. Valores medios de redondez y su desviación típica

Vel. Rotación (V_w) [r/min]	Profundidad (a_e) [μm]	Redondez [μm]	Desv. Típica [μm]
60	0	3,67	0,58
	20	2,28	0,59

MEMORIA

	40	1,70	0,24
	80	1,52	0,35
170	0	4,30	0,70
	20	12,32	4,75
	40	3,20	0,47
	80	2,95	0,33
230	0	3,60	0,42
	20	7,31	2,01
	40	1,58	0,40
	80	2,15	1,53
460	0	7,13	0,90
	20	21,45	4,18
	40	2,64	0,25
	80	3,58	2,29

Así mismo se obtienen las gráficas representadas en la Figura 9.7 y Figura 9.8 además de las comparativas, según velocidad o profundidad constantes, mostradas en las Figura 9.9 y Figura 9.10 respectivamente.

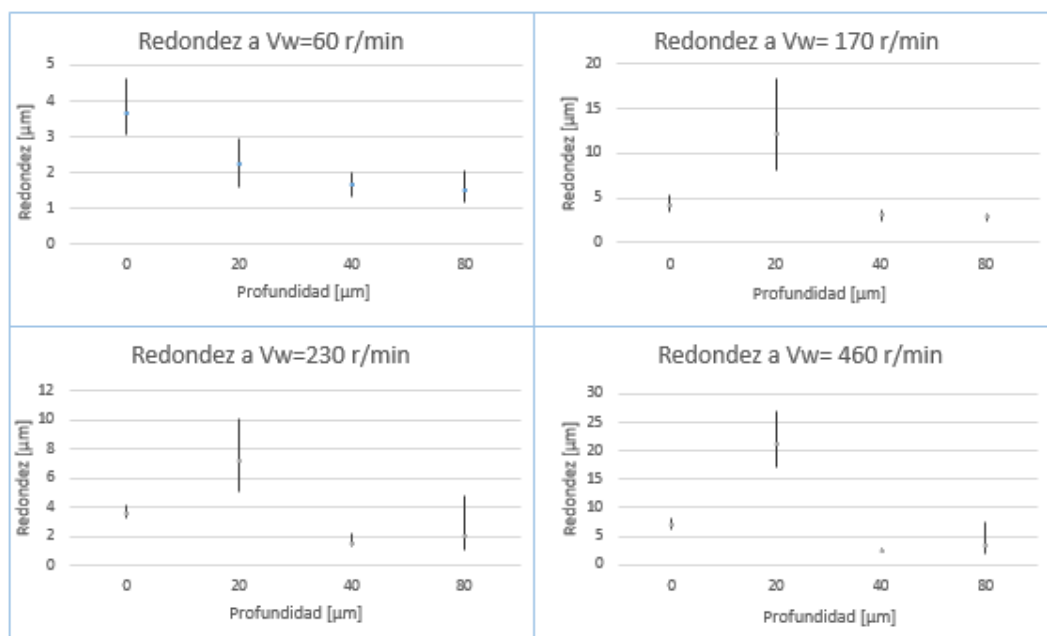


Figura 9.7. Valores de redondez en función de la profundidad a_e , para cada velocidad V_w

La Figura 9.7 muestra la influencia de la profundidad (a_e) en la redondez medida para cada velocidad de rotación de la pieza (V_w). Aunque sea con la comparativa realizada en

MEMORIA

la Figura 9.9 donde se analice en mayor detalle los valores medios de redondez calculados, se observa a priori dos tendencias claramente diferenciadas. Así pues en la primera gráfica ($V_w=60$ r/min) se observa como los valores medios de redondez por profundidad empleada (a_e) van disminuyendo a medida que este último aumenta, de igual forma que con la desviación típica. En el resto de casos la redondez, tanto en términos del valor medio y de dispersión de las medidas, parece alcanzar un pico máximo a la profundidad (a_e) de $20\text{ }\mu\text{m}$ para luego disminuir a valores bastante parejos entre sí e incluso inferiores a la redondez obtenida en la sección sin rectificar ($a_e=0\text{ }\mu\text{m}$). No obstante, esta observación comentada para las profundidades de 40 y $80\text{ }\mu\text{m}$ no parece cumplirse en términos de desviación típica, que en algunos casos ($V_w=40\text{ }\mu\text{m}$ y $V_w=80\text{ }\mu\text{m}$) refleja una destacada dispersión de las medidas aunque parece que no llega a ser una tan elevada como la calculada a la profundidad (a_e) de $20\text{ }\mu\text{m}$.

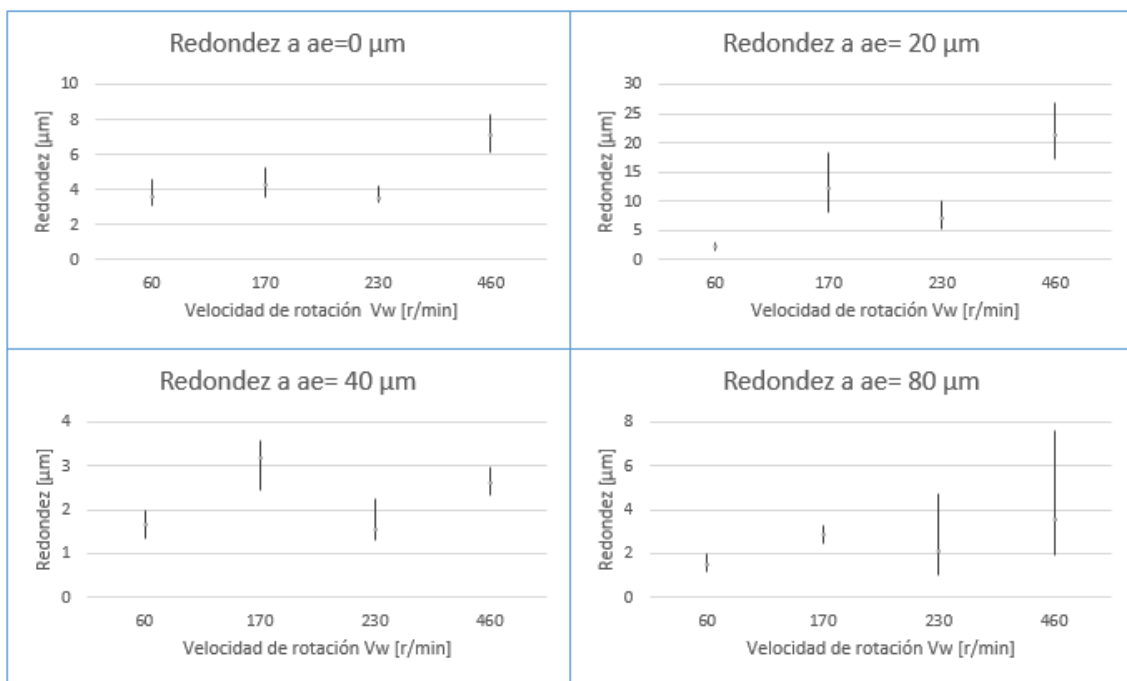


Figura 9.8. Valores de redondez en función de la velocidad V_w , para cada profundidad a_e

La Figura 9.8 muestra, en este caso, la variación del promedio de la redondez y su desviación típica en función de la velocidad de rotación de la pieza (V_w) para cada profundidad empleada (a_e). La gráfica catalogada a profundidad nula ($a_e=0\text{ }\mu\text{m}$) corresponde a las secciones sin rectificar, es decir, a la redondez correspondiente a aquellas secciones únicamente torneadas en seco. Es llamativo que, incluso en esta gráfica, se observa la misma tendencia que en el resto de casos para los valores medios de redondez obtenidos, lo que considerando que cada velocidad de rotación (V_w) se corresponde a una probeta diferente, da pie a considerar que las probetas presentan desviaciones de forma previas a las operaciones de rectificado. La evaluación de tal

MEMORIA

tendencia mostrada por los valores de redondez pasa a llevarse a cabo en la Figura 9.10. Respecto a la desviación típica calculada, no se aprecia una tendencia clara ya sea en función de la velocidad de rotación de las probetas (V_w) o de la profundidad empleada (a_e) – análisis similar al ya realizado sobre la Figura 9.7 –. No obstante destacan valores puntuales como los obtenidos a la profundidad (a_e) de 80 μm con velocidades de rotación (V_w) iguales a 230 y 460 r/min, siendo el valor correspondiente a esta última velocidad, la que representa mayor dispersión entre las medidas tomadas de redondez.

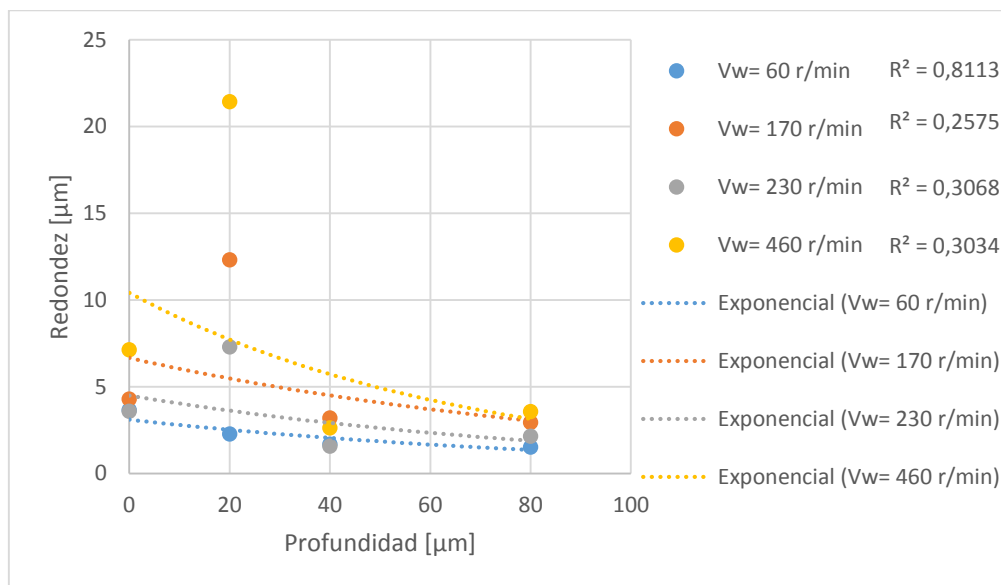


Figura 9.9 Comparación entre las evoluciones de la redondez con la profundidad a_e para cada velocidad V_w

Como ya se comentase anteriormente, la gráfica de la Figura 9.9 compara la redondez medida según la profundidad empleada en la operación de rectificado (a_e) para cada velocidad fijada en la rotación de la probeta (V_w). La línea de tendencia con la que se ajusta cada conjunto de medidas de redondez – asociados a una determinada velocidad de rotación (V_w) – es representada, en todos los casos, mediante una función exponencial, dado que esta permite, para todas las series de datos, un ajuste óptimo. Según estas líneas de tendencia, la redondez disminuye con la profundidad de rectificado (a_e), siendo más pronunciada esta tendencia a la velocidad de rotación máxima escogida ($V_w = 460$ r/min). No obstante si se focaliza la atención en los datos obtenidos, se observa lo ya comentado con la Figura 9.7; la redondez resultante a la mínima velocidad de rotación escogida ($V_w = 60$ r/min) es la que mejor se ajusta a la línea de tendencia exponencial, como demuestra su correspondiente valor de mínimos cuadrados ($R^2 = 0,813$). Para el resto de velocidades (V_w) sin embargo, el ajuste es peor a consecuencia de los altos valores de redondez registrados a la profundidad (a_e) de 20 μm . En el caso concreto de la operación a esta profundidad (a_e) y velocidad (V_w) de 170

MEMORIA

r/min, se puede considerar como causa del alto valor registrado la posible refrigeración ineficiente durante la ejecución del mismo (ver Figura 9.5).

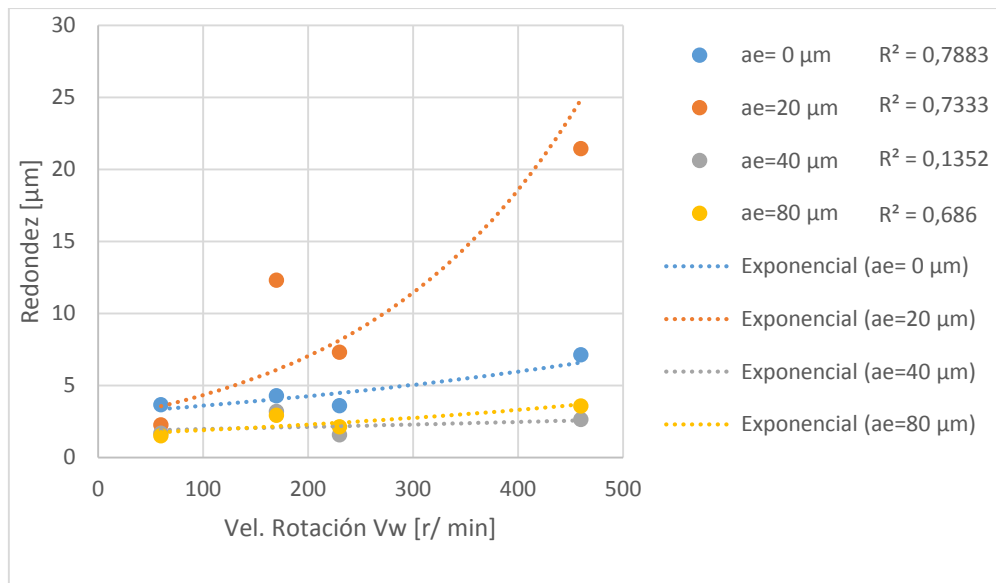


Figura 9.10. Comparación entre las evoluciones de la redondez con la velocidad V_w para cada profundidad a_e

La Figura 9.10 muestra, para cada valor constante de profundidad (a_e), la influencia de la velocidad de rotación de la probeta (V_w) sobre la redondez obtenida en cada sección rectificada. Como ya se hiciera en la comparación anterior (ver Figura 9.9) la línea de tendencia empleada corresponde a una función exponencial. Según estas se observa claramente cómo, a mayor velocidad de rotación (V_w), la redondez de la sección mecanizada es mayor. Por otro lado, los valores de redondez agrupados en la serie denominada como $a_e=0 \mu\text{m}$, corresponden a la redondez obtenida mediante la operación de torneado en seco previa al rectificado. La línea de tendencia obtenida para estos, además de ser la que mejor se ajusta a los datos ($R^2=0.7883$), destaca por presentar, al igual que las demás, una pendiente ascendente. Considerando que cada velocidad de rotación (V_w) corresponde a una probeta determinada, se vuelve a comentar lo supuesto en el análisis de la Figura 9.8; las probetas no presentan formas idénticas a consecuencia de operaciones previas al rectificado. No obstante, se toman estos datos como referencia a la hora de comparar las diferentes operaciones de rectificado respecto a la operación de torneado en seco realizada en primer lugar. Así pues, de las operaciones de rectificado, únicamente las ejecutadas a la profundidad (a_e) de $20 \mu\text{m}$ proporciona una mayor redondez respecto al torneado en seco, siendo el ensayo a velocidad (V_w) 460 r/min el que resulta en una mayor desviación de forma. En el caso concreto de la operación a esta profundidad (a_e) y velocidad (V_w) de 170 r/min, se puede considerar

MEMORIA

como causa del alto valor registrado la posible refrigeración ineficiente durante la ejecución del ensayo (ver Figura 9.5).

Análisis de la cilindridad

Los valores de cilindridad medidos aparecen representados en la Tabla 9.3. A partir de los mismos se obtienen las gráficas de la Figura 9.11 y Figura 9.12 empleadas en el análisis de esta propiedad.

Tabla 9.3. Resultados de cilindridad obtenidos para cada ensayo

Vel. Rotación (V_w) [r/min]	Profundidad (a_e) [μm]	Cilindridad [μm]
60	0	17,45
	20	35,54
	40	34,86
	80	36,57
170	0	22,56
	20	41,08
	40	26,20
	80	26,23
230	0	27,58
	20	40,91
	40	27,50
	80	26,38
460	0	43,93
	20	58,19
	40	33,61
	80	34,05

En la Figura 9.11 se comparan los valores de cilindridad medidos en función de la profundidad empleada en el rectificado (a_e) para cada velocidad de rotación de la pieza (V_w), habiéndose empleado además funciones exponenciales como líneas de tendencia para cada serie de datos. A partir de estas últimas es difícil establecer una tendencia común. Mientras que para velocidades (V_w) de 170, 230 y 460 r/min se observa como la cilindridad disminuye con la profundidad (a_e), la mínima velocidad de rotación seleccionada ($V_w = 60$ r/min) muestra, en cambio, una tendencia contraria.

MEMORIA

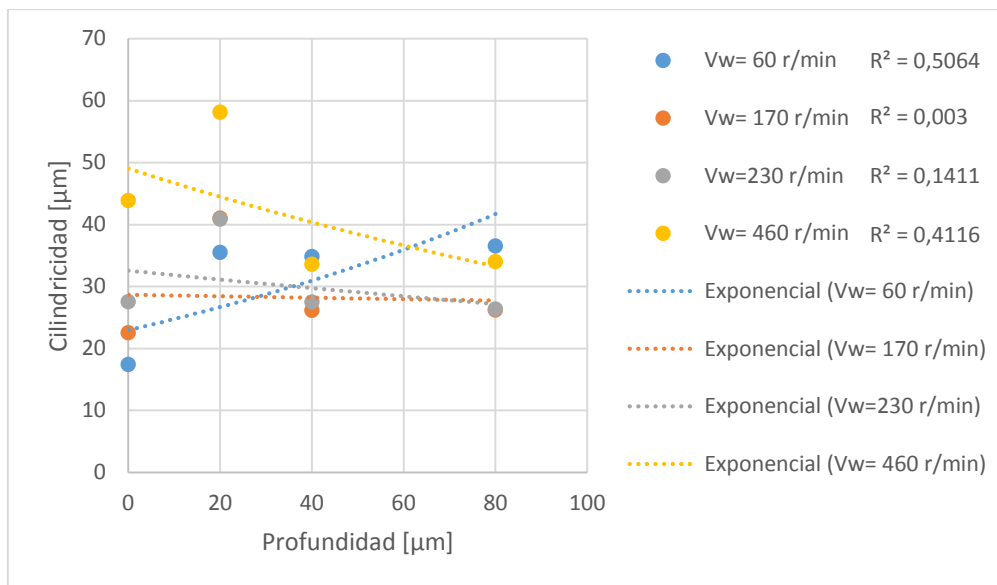


Figura 9.11 Comparación entre las evoluciones de la cilindridad con la profundidad a_e para cada velocidad V_w

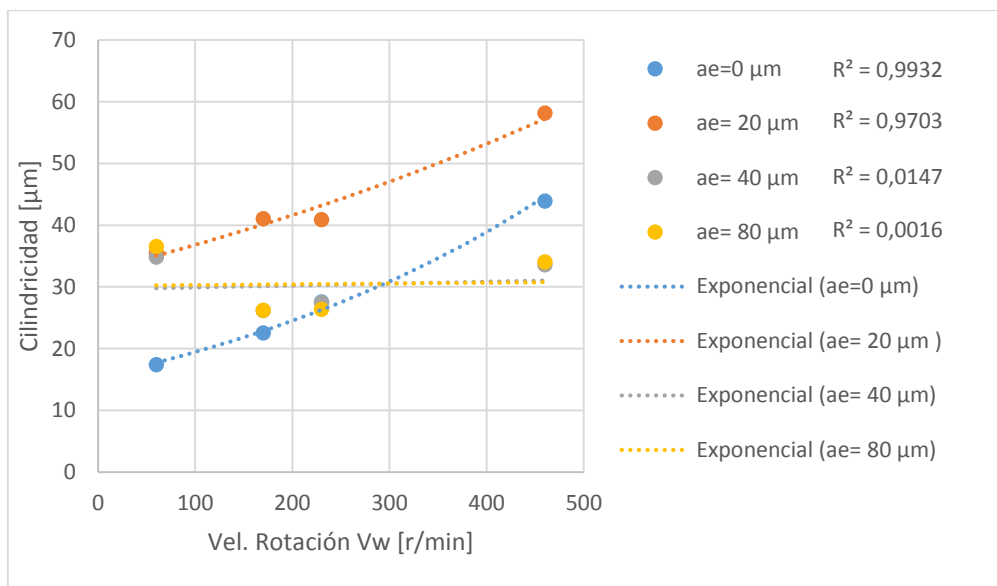


Figura 9.12 Comparación entre las evoluciones de la cilindridad con la velocidad V_w para cada profundidad a_e

En la Figura 9.12 se comparan los valores de cilindridad medidos en función de la velocidad de rotación de la pieza (V_w), para valores fijos de la profundidad empleada en el rectificado (a_e), habiéndose empleado nuevamente funciones exponenciales como líneas de tendencia para cada serie de datos. Como ya ocurriese en la Figura 9.11 se diferencian nuevamente dos tipos de tendencias. En este caso se puede observar cómo, tanto la línea de tendencia a profundidad (a_e) de 40 y 80 μm apenas presentan pendiente, diferencia de la pendiente positiva que demuestran las líneas de tendencia correspondientes a las profundidades de 20 μm y aquella correspondiente al acabado

MEMORIA

previo a la operación de torneado. Llama la atención que esta última línea de tendencia tenga pendiente positiva, pues demuestra, como ya se observase con el análisis de redondez, que las probetas presentan cierta desviación de forma previo al rectificado. A partir de esta línea de tendencia se observa que, únicamente las operaciones de rectificado a profundidades (a_e) de 40 y 80 μm junto a una velocidad de rotación (V_w) superior a 300 r/min aproximadamente, consiguen mejorar la cilindridad de las probetas.

Análisis de la rectitud

De igual forma que en los casos anteriores, para el análisis de la rectitud se expone la Tabla 9.4 con los valores medios y desviación típica, junto con las gráficas representadas por la Figura 9.13, Figura 9.14, Figura 9.15 y Figura 9.16.

Tabla 9.4. Valores medios de la rectitud y su desviación típica

Vel. Rotación (V_w) [r/min]	Profundidad (a_e) [μm]	Rectitud [μm]	Desv. Típica [μm]
60	0	7,23	0,96
	20	14,35	1,28
	40	14,25	0,77
	80	14,51	0,88
170	0	9,37	1,18
	20	14,58	2,67
	40	12,41	8,05
	80	12,53	1,96
230	0	12,15	3,71
	20	15,14	1,74
	40	14,12	1,05
	80	13,76	1,43
460	0	19,47	2,96
	20	19,71	13,56
	40	16,26	3,68
	80	17,24	3,66

MEMORIA

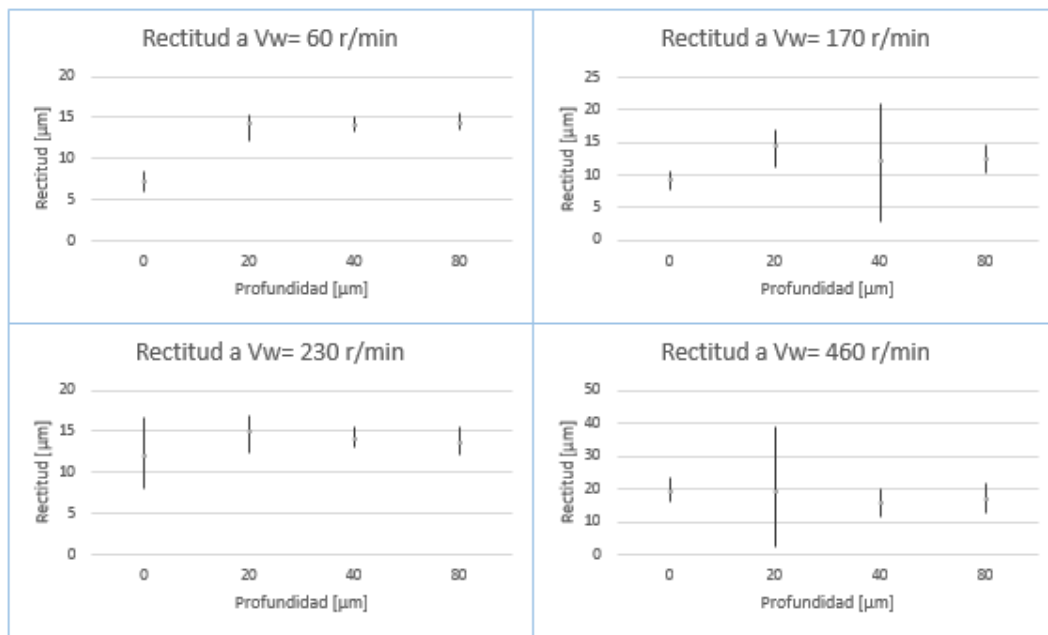


Figura 9.13. Valores de rectitud en función de la profundidad a_e , para cada velocidad V_w

La Figura 9.13 representa, para una velocidad de rotación de la pieza (V_w) seleccionada, como influye en la rectitud de la misma la profundidad empleada en el rectificado (a_e). Cada valor representado es el promedio de las medidas de rectitud registradas para cada ensayo junto con la desviación típica de las mismas (ver Tabla 9.4). El análisis de cómo influye la profundidad (a_e) en la rectitud se llevará a cabo en mayor detalle mediante la gráfica de la Figura 9.15. No obstante, respecto a la desviación típica calculada para cada ensayo, se destacan los ensayos correspondientes a la primera gráfica ($V_w = 60$ r/min) por ser los que presentan una menor dispersión de las medidas tomadas, al contrario que los casos particulares del ensayo a profundidad (a_e) 40 μm y velocidad (V_w) igual a 170 r/min, así como, el ensayo a profundidad (a_e) 20 μm y velocidad (V_w) igual a 460 r/min, en los que se puede observar un excesivo valor de dicha desviación típica. El menor y mayor valor de esta medida de dispersión tienen que ver – considerando la metodología de evaluación expuesta en apartado 8.2.3 – con la menor y mayor uniformidad, respectivamente, de la rectitud en toda la superficie de la sección correspondiente a cada ensayo. La inexistencia de una tendencia clara para los valores de desviación típica, común a las velocidades de rotación (V_w) empleadas, dificulta la determinación de una causística a la diferente uniformidad de la rectitud para las distintas secciones. No obstante se destaca como, de forma común a las distintas velocidades de rotación (V_w), el empleo de una profundidad de rectificado igual a 80 μm , consigue aumentar dicha uniformidad respecto al resto de profundidades (a_e).

MEMORIA

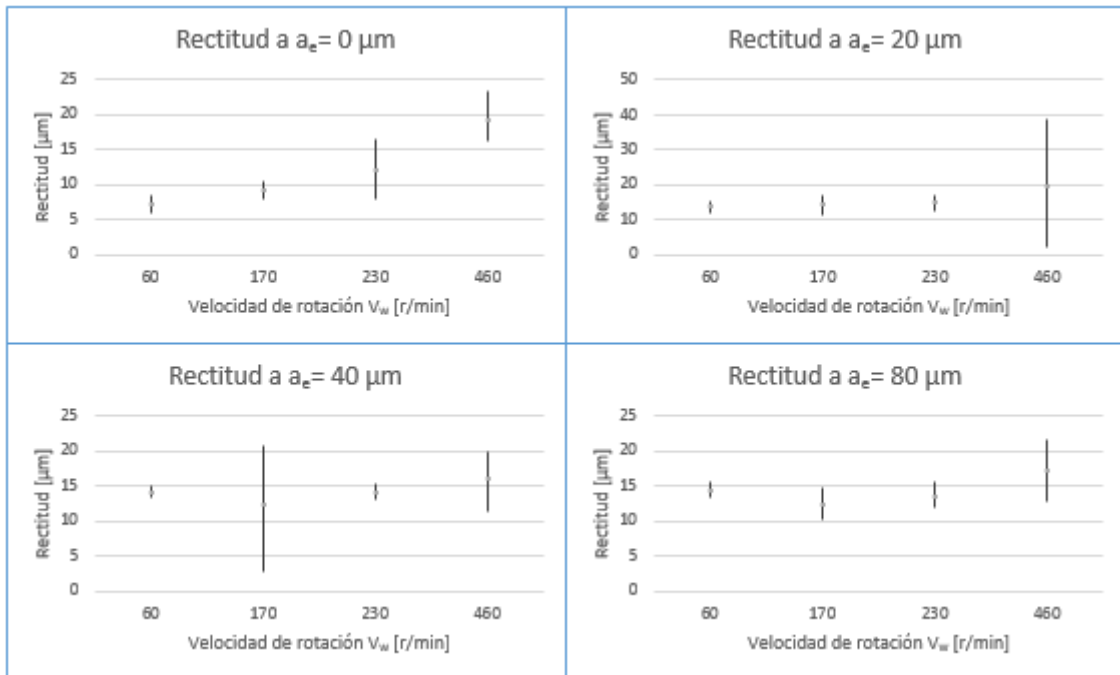


Figura 9.14. Valores de rectitud en función de la velocidad V_w , para cada profundidad a_e

La Figura 9.14 representa, para una determinada profundidad empleada en el rectificado (a_e), como influye velocidad de rotación de la pieza (V_w) en la rectitud obtenida en la misma. A diferencia de la Figura 9.13, en estas gráficas si puede observarse cierta tendencia común, tanto para el promedio obtenido de las medidas de rectitud como de la desviación típica de las mismas. No obstante, el análisis de cómo influye la velocidad de rotación (V_w) en la rectitud se llevará a cabo con mayor detalle mediante la gráfica de la Figura 9.16. Respecto a la desviación típica si se comenta que, la dispersión de las medidas de rectitud se ve aumentada con el incremento de la velocidad de rotación (V_w), exceptuando el ensayo a la velocidad (V_w) de 170 r/min para la profundidad (a_e) de 40 μm , ya comentado anteriormente por el alto valor de desviación típica obtenido. Así pues se puede interpretar que, independientemente de la profundidad empleada en el rectificado (a_e), la rectitud es cuanto más uniforme en la superficie de la sección rectificada cuanto menor es la velocidad de rotación (V_w) de la pieza. Por último, y aunque se haya propuesto no evaluar la influencia de la velocidad de rotación (V_w), llama la atención el incremento de la rectitud, con este parámetro de corte, para las mediciones realizadas sobre la superficie torneada en seco ($a_e=0$). Considerando que cada velocidad de rotación (V_w) corresponde a una probeta usada en el estudio, se concluye, como ya se hiciera en la evaluación de la redondez y la cilindridad, que dichas probetas no poseen formas equivalentes previo rectificado de las mismas.

MEMORIA

La Figura 9.15 compara, para diferentes velocidades de rotación de la pieza (V_w), como influye en la rectitud de la misma la profundidad empleada en el rectificado (a_e). Para cada serie de datos, la tendencia correspondiente a los mismos ha sido representada mediante una función exponencial. Prestando atención a las mismas se observa diferentes tendencias. Por un lado la función correspondiente a la mínima velocidad seleccionada ($V_w=60$ r/min) presenta una evolución ascendente, al igual que las correspondientes a velocidades (V_w) de 170 r/min y 230 r/min, aunque el crecimiento de la rectitud con la profundidad (a_e) no sea tan acusado en este caso. En cambio, a la velocidad de rotación máxima ($V_w=460$ r/min) la línea de tendencia demuestra justo lo contrario, es decir, la rectitud disminuye con la profundidad empleada (a_e). Aun así, los valores de rectitud obtenidos se mantienen por encima de los registrados para el resto de velocidades, incluso a la profundidad (a_e) de 80 μm . Tales líneas de tendencia analizadas están, en gran parte, influenciadas por la excesiva rectitud que alcanzan a la profundidad (a_e) de 20 μm . Se destaca pues, como la rectitud, a esta mínima profundidad empleada ($a_e=20$ μm), supera ampliamente a la obtenida con el resto de profundidades empleadas (a_e).

La gráfica representada en la Figura 9.16 compara, para diferentes profundidades empleadas en el rectificado (a_e), cómo influye la velocidad de rotación de la pieza (V_w) en la rectitud de la misma. De nuevo se han representado funciones exponenciales a modo de líneas de tendencia para cada serie de datos. Considerando la Figura 8.14 los datos correspondientes a la serie $a_e=0$ μm muestran la rectitud medida sobre la superficies torneadas en seco. Como ya ocurriese en la evaluación de las propiedades de redondez y cilindridad, la línea de tendencia obtenida para dicha serie, refleja un crecimiento de la rectitud en estas superficies con la velocidad de rotación (V_w). Teniendo en cuenta que cada una de estas velocidades seleccionadas (V_w) corresponde a una probeta empleada en el estudio, se repite la conclusión considerada en el análisis de la primera gráfica mostrada en la Figura 9.14; estas probetas no comparten la misma forma previa a su rectificado. Esta condición inicial en los ensayos de rectificado ha podido influir para que, de igual forma, en los sucesivos ensayos a profundidades (a_e) de 20 μm , 40 μm y 80 μm , la rectitud aumente con la velocidad de rotación de la pieza (V_w). No obstante se comparan la rectitud obtenida en estas operaciones de rectificado respecto a la obtenida mediante el torneado en seco. Se observa pues que, la rectitud mejora con el rectificado a velocidades bastante superiores a los 350 r/min aproximadamente, consiguiendo pues esta mejora a la velocidad máxima escogida de 460 r/min y las profundidades de 40 μm y 80 μm . La profundidad de 20 μm resultará en una mayor rectitud respecto al torneado, igualándose únicamente con esta a la velocidad de 460 r/min.

MEMORIA

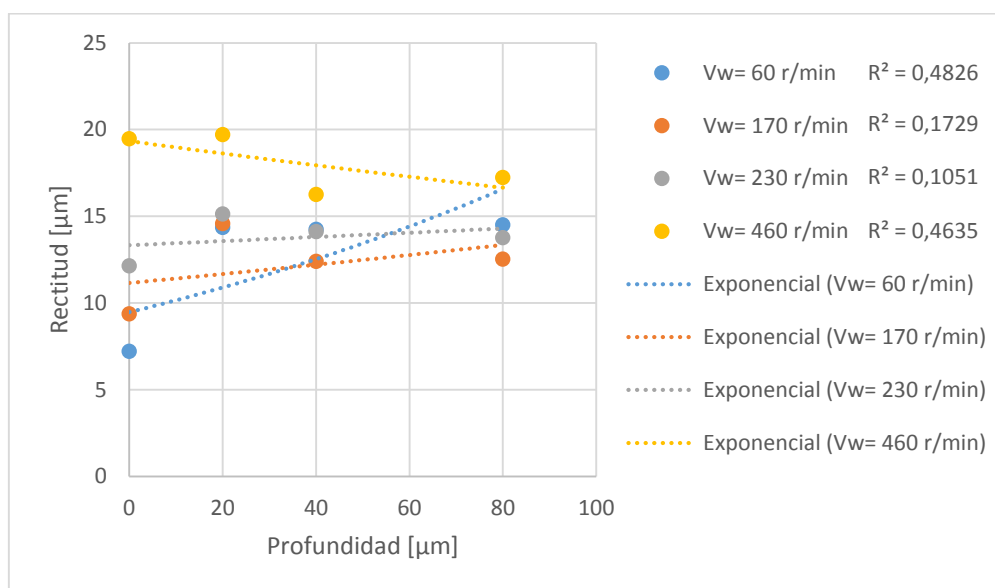


Figura 9.15. Comparación entre las evoluciones de la rectitud con la profundidad a_e para cada velocidad V_w

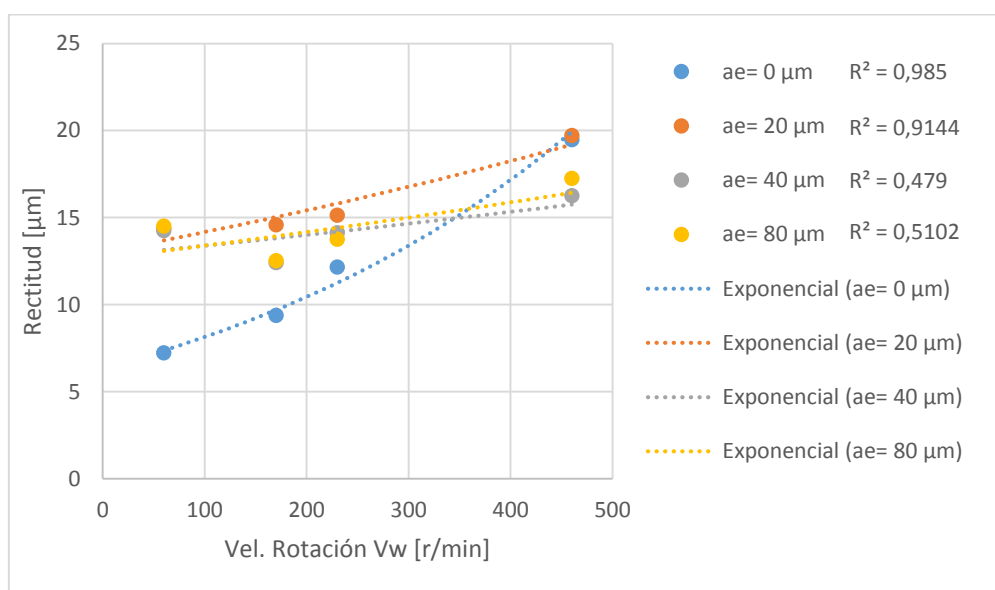


Figura 9.16. Comparación entre las evoluciones de la rectitud con la velocidad V_w para cada profundidad a_e

9.3. Resultados de microdureza

Finalmente, se analizan los resultados expuestos en la Tabla 9.5 correspondientes a la microdureza de los distintos ensayos. Siguiendo el mismo procedimiento de análisis que en las evaluaciones de micro y macrogeometría, se obtiene a partir de dicha tabla las gráficas mostradas en la Figura 9.17, Figura 9.18 y Figura 9.19. Las mediciones

MEMORIA

obtenidas para cada ensayo, base de estos resultados, se recogen en las tablas expuestas al comienzo del ANEXO IX.

Tabla 9.5. Valores medios de microdureza y su desviación típica

Vel. Rotación (V_w) [r/min]	Profundidad (a_e) [μm]	Microdureza [HV]	Desv. Típica [HV]
60	0	407,50	20,34
	20	397,67	30,63
	40	365,33	32,06
	80	394,33	15,15
170	0	416,83	11,20
	20	306,50	42,72
	40	394,33	35,95
	80	397,50	19,37
230	0	405,33	18,22
	20	394,17	20,53
	40	394,00	43,71
	80	404,50	28,43
460	0	404,33	18,97
	20	405,67	45,93
	40	410,00	29,75
	80	425,83	30,74

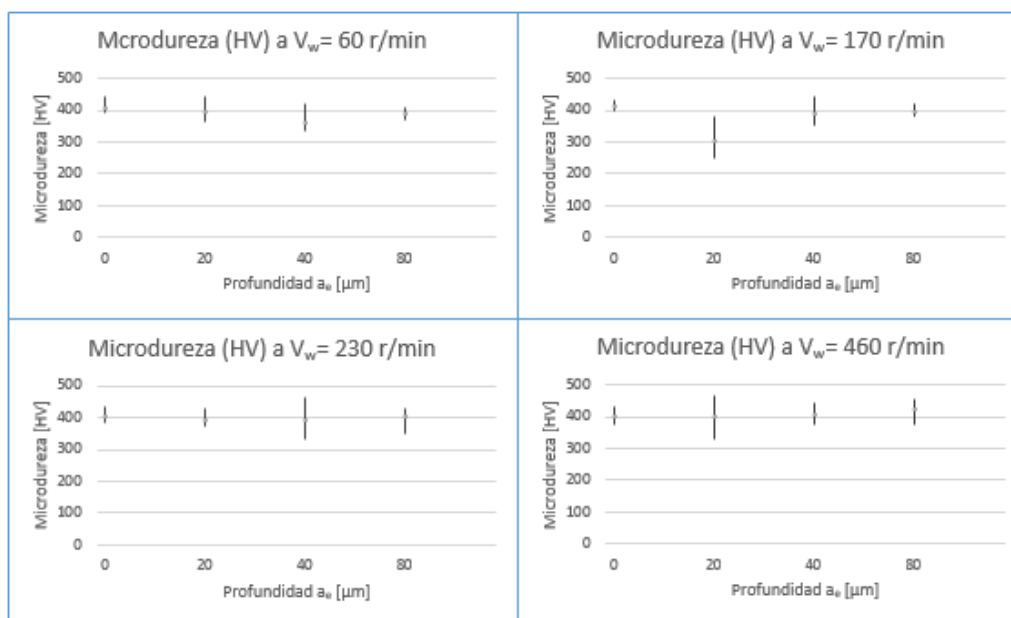


Figura 9.17. Valores de microdureza en función de la profundidad a_e , para cada velocidad V_w

Mediante la Figura 9.17 se puede observar que, de forma aislada para cada velocidad de rotación de la pieza (V_w), la microdureza del material apenas varía. En cuanto a la

MEMORIA

desviación típica del material, la dispersión de los datos para cada ensayo realizado parece no ser excesiva, destacando en este sentido las operaciones a velocidad igual a 60 r/min. No obstante, se ha obtenido una dispersión más pronunciada en casos como los realizados a 230 r/min y 460 r/min con profundidad de 40 μm y 20 μm respectivamente. Estas últimas observaciones se ajustan difícilmente a una tendencia clara sobre la desviación típica, y consecuente uniformidad del acabado de las secciones mecanizadas, más allá de considerar que, tanto el rectificado como el torneado, no afectan a la uniformidad de la microdureza de la pieza. Por otro lado, la también pronunciada desviación típica, así como la menor microdureza observadas, para el ensayo a velocidad de 170 r/min y profundidad igual a 20 μm , puede considerarse debido a los problemas transcurridos durante la operación ya comentados en el análisis de la rugosidad a partir de la Figura 9.5 (ver apartado 9.1).

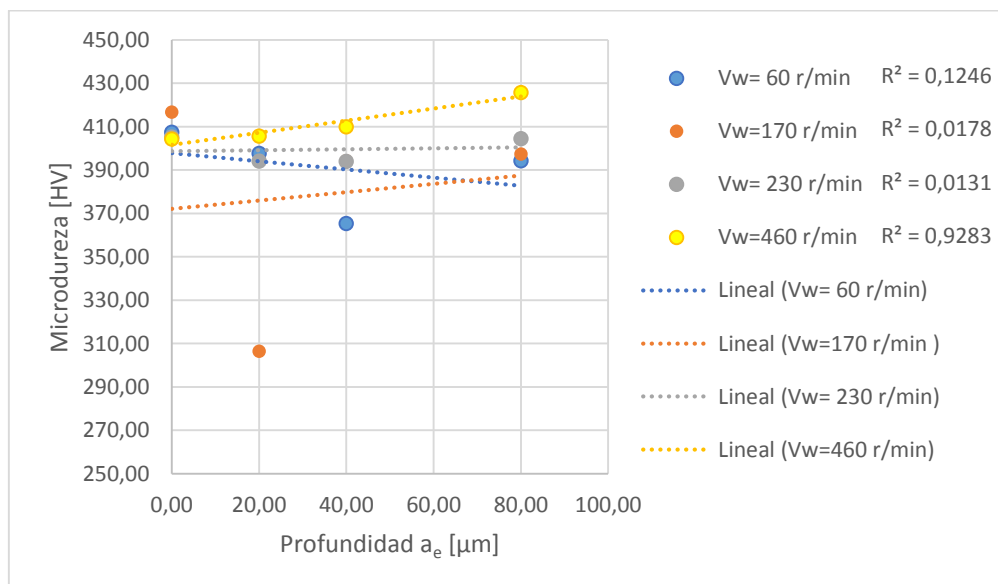


Figura 9.18. Comparación entre las evoluciones de la microdureza con la profundidad a_e para cada velocidad V_w

El análisis de la Figura 9.18 es en principio complejo a consecuencia de las diferentes tendencias observadas para cada serie de datos. Dichas tendencias han sido representadas en este caso mediante funciones lineales. A partir de las mismas, se puede apreciar como las medidas obtenidas para los ensayos a una velocidad (V_w) de 230 r/min son las más parecidas entre sí, observándose respecto a esta como las líneas de tendencias correspondientes a las velocidades de 60 r/min y 460 r/min sí presentan pendiente, negativa y positiva respectivamente. Las mediciones obtenidas para los ensayos a 170 r/min se ajustan a una tendencia difícilmente comparable a la del resto de series, consecuencia del destacado valor inferior obtenido a profundidad (a_e) de 20 μm respecto al resto de valores de la serie. Por tanto, como ya se comentase para la

MEMORIA

Figura 9.17, tal baja microdureza obtenida con la velocidad de 170 r/min y profundidad de 20 μm , es probablemente debida a los problemas acaecidos durante la ejecución de este ensayo (ver Figura 9.5).

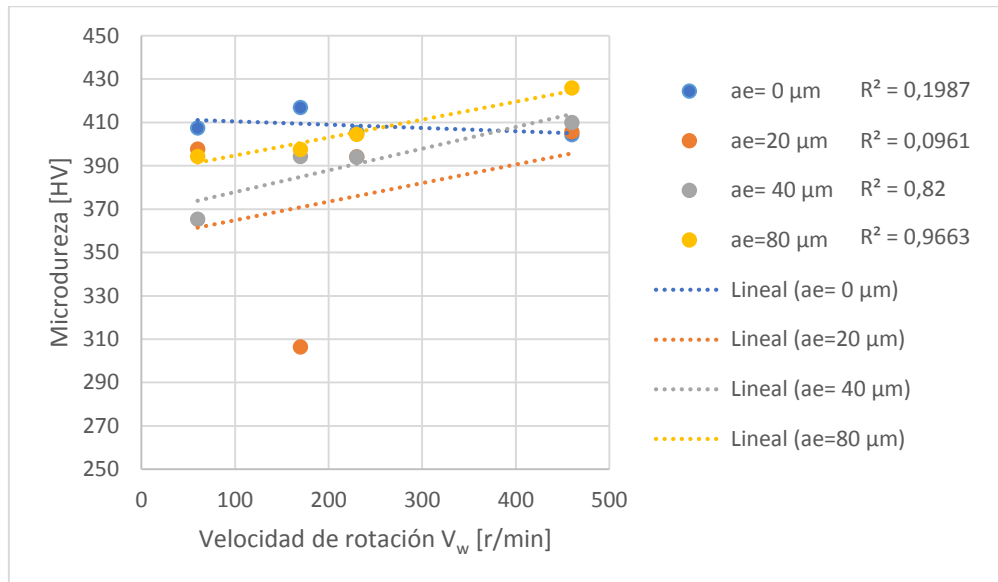


Figura 9.19. Comparación entre las evoluciones de la microdureza con la velocidad V_w para cada profundidad a_e

La comparación de la influencia de la velocidad de rotación de la pieza (V_w) sobre la microdureza (HV) para cada valor constante de profundidad (a_e) escogido (ver Figura 9.19) permite obtener información interesante sobre el proceso de rectificado en relación a la operación de torneado en seco previa a este. Aquellos valores en los que la profundidad es definida como nula ($a_e=0$), corresponden a la medición de la microdureza sobre las superficies torneadas en seco de las diferentes probetas. Los valores obtenidos de estas mediciones se muestran como los más parejos entre sí y próximos a un valor medio de 400 HV. Para las operaciones de rectificado en cambio se aprecia cómo, a mayor velocidad de rectificado (V_w), la microdureza superficial se incrementa. Así mismo cuanto mayor es la profundidad mayores son los valores de microdureza obtenidos. De esta forma se destaca cómo, a una profundidad de 80 μm y velocidad de 460 r/min, se llegan a alcanzar valores de microdureza superiores a los obtenidos con el proceso de torneado en seco.

Capítulo 10

10. Conclusiones y líneas futuras

En este capítulo se exponen las conclusiones extraídas, así como, se proponen ciertas líneas futuras de investigación y recomendaciones para mejorar la metodología experimental, en base a los resultados recogidos en el Capítulo 9.

10.1. Conclusiones

Según los resultados y gráficas expuestos y discutidos en el capítulo anterior, se pretende en este apartado extraer ciertas conclusiones en relación a los valores y tendencias observadas para cada aspecto o propiedad evaluada, en base al procedimiento ejecutado o diferente bibliografía empleada.

10.1.1. Microgeometría

Los resultados obtenidos para la rugosidad (R_a) demuestran una mejora de la calidad superficial mediante el rectificado de las piezas previamente torneadas en seco. Esto justifica el empleo de este tipo de mecanizado abrasivo en aquellas piezas que requieren de altas exigencias en el acabado superficial, caso de piezas fabricadas en Ti6Al4V usadas en el sector aeroespacial. El motivo por el cual se produce esta mejora es que, mediante el rectificado, se consigue mecanizar la “huella” generada tras cada pasada de la herramienta de torneado, reduciendo así la altura del perfil de rugosidad generado por tal proceso de torneado previo (ver Figura 10.1 y Figura 10.2).

Así pues, cuanto mayor es la profundidad empleada en el rectificado (a_e) se observa una mayor reducción del valor medio y desviación típica de R_a (ver Figura 9.1 y Figura 9.3), es decir, el acabado de la sección rectificada es mejor y más uniforme. No obstante, según el estudio llevado a cabo, el empleo de una profundidad igual a $20\text{ }\mu\text{m}$ o $40\text{ }\mu\text{m}$ consigue valores de R_a menores que mediante el uso de la profundidad máxima seleccionada igual a $80\text{ }\mu\text{m}$. Esto es debido a que, cuanto mayor es la profundidad de mecanizado, mayor es la superficie de contacto entre los abrasivos del disco y la superficie de la pieza, lo que da lugar al aumento de la fricción entre herramienta y material. De esta forma, a raíz de las altas temperaturas alcanzadas en esta zona de contacto, aparecen efectos térmicos adversos que favorecen al desgaste de la herramienta, así como, un excesivo reblandecimiento y adhesión del material sobre esta

MEMORIA

última - pudiéndose desgastar por “embotamiento” (ver Figura 6.12) - y la pieza, incrementándose consecuentemente la rugosidad de la misma [52 y 53]. Por lo tanto, aunque se mejore la calidad superficial, un aumento excesivo de la profundidad empleada en el rectificado llega a ser contraproducente, aún más teniendo en cuenta la baja conductividad térmica del titanio.

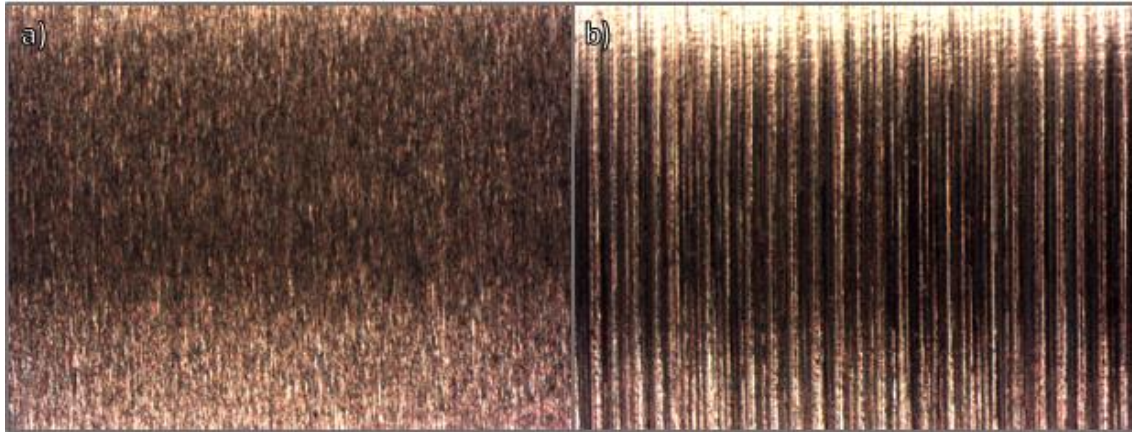


Figura 10.1. Comparativa en imágenes SOM del acabado conseguido con a) rectificado ($a_e = 40 \mu\text{m}$ & $V_w = 230 \text{ r/min}$) y b) torneado (en seco). Zoom 3.0

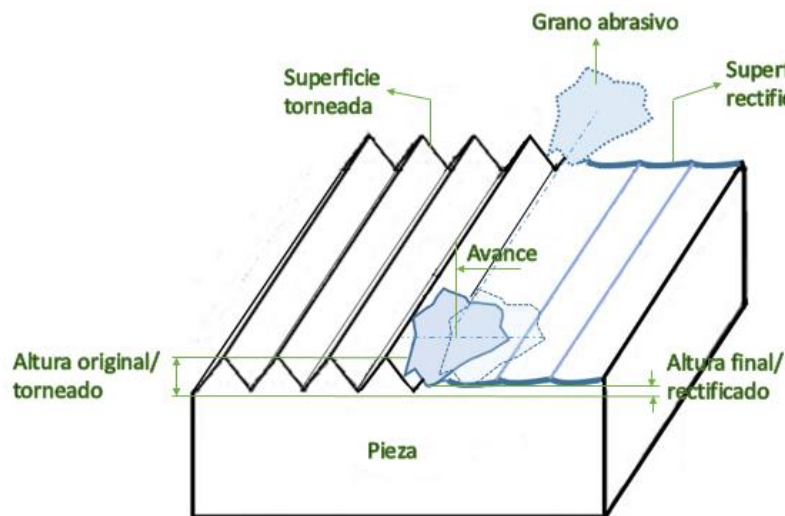


Figura 10.2. Esquema en el que se compara el perfil de rugosidad originado mediante el torneado y el rectificado de la superficie

Respecto a la velocidad de rotación de la pieza (V_w), se observa la misma tendencia que la descrita para el caso de la profundidad (a_e); la rugosidad (R_a) disminuye con el aumento de esta velocidad (V_w) hasta un determinado valor de la misma; 230 r/min (ver Figura 9.4). En este caso se entiende que, a consecuencia del menor tiempo de contacto entre la pieza y los granos abrasivos, se reduce el calor localizado en dicha área. Así pues, la menor fricción que debe generarse, facilita el mecanizado de mayor cantidad

MEMORIA

de material, por parte de los granos activos de la muela abrasiva, motivando así la reducción de la rugosidad. No obstante, a velocidades de la pieza (V_w) lo suficientemente altas – como ocurre a 460 r/min – el valor de R_a se ve incrementado. Esta menor calidad superficial alcanzada puede estar debida al cada vez mayor desgaste de la herramienta, que pasaría de la atricción o desfilamiento del grano a la fractura y desprendimiento del mismo, según la mayor o menor profundidad empleada (a_e) respectivamente. Así mismo, la mayor profundidad de corte (a_e) supondría un incremento del tiempo de contacto y el número de granos activos, es decir, inevitablemente se tendrían los efectos térmicos adversos ya señalados en el análisis de la influencia de la profundidad (a_e). Ejemplo de ello es el ensayo realizado a la velocidad (V_w) máxima de 460 r/min y la profundidad (a_e), también máxima, de 80 μm , en el que la rugosidad superficial obtenida llega a ser bastante superior respecto a la conseguida con el torneado en seco.

Cabe destacarse además el ensayo realizado a la velocidad de rotación (V_w) de 170 r/min y profundidad de rectificado (a_e) de 20 μm , por la paupérrima calidad superficial conseguida en el mismo. Como se ha podido contrastar con resultados llevados a cabo en otros estudios [51], el valor de R_a alcanzado ha sido debido a variaciones en las condiciones de ejecución del ensayo, probablemente debidas a la refrigeración inadecuada del proceso según se concluye de la imagen SOM obtenida de su superficie (ver Figura 9.5). Esto permite demostrar la importancia de la refrigeración durante la operación de rectificado, pues si este no se consigue optimizar, el rectificado llega a ser contraproducente, como bien se observa al comparar este resultado respecto al obtenido con el torneado en seco.

10.1.2. Macrogeometría

En el caso de las propiedades macrogeométricas evaluadas, dado que dicha evaluación ha consistido en la obtención de las desviaciones de forma de redondez, cilindridad y rectitud (ver apartados 7.2.1, 7.2.2 y 7.2.3), en la máxima longitud posible de cada sección (ver apartado 8.2.3), se puede intuir la misma influencia que la demostrada para la rugosidad (R_a). Así pues la reducción o aumento del perfil de rugosidad con los parámetros de profundidad (a_e) y velocidad de rotación de la pieza (V_w), supondría el correspondiente aumento o disminución de tales desviaciones de forma.

Sin embargo, la relación comentada entre las desviaciones de forma y los parámetros empleados en el rectificado, no se corresponden con los resultados obtenidos para cada propiedad. El único caso en el que se cumple esta hipótesis es en la evaluación de la redondez con la profundidad empleada (a_e) en el rectificado (ver Figura 9.9), pues se observa cómo, con el rectificado, la redondez disminuye respecto a la obtenida con el

MEMORIA

torneado en seco, aún más cuanto mayor es la profundidad empleada en este tipo de mecanizado (a_e). No obstante al evaluar cómo influye la velocidad (V_w) en esta propiedad, se observa la tendencia contraria (ver Figura 9.10. Comparación entre las evoluciones de la redondez con la velocidad V_w para cada profundidad a_e). De igual forma la rectitud se ve aumentada con el aumento de la velocidad de rotación de la pieza (V_w).

Respecto a la influencia de la profundidad empleada (a_e) en la rectitud obtenida, es difícil determinar una tendencia clara; mientras que a las velocidades de 60, 170 y 230 r/min la rectitud aumenta con la profundidad (a_e), a la máxima velocidad (V_w) de 460 r/min la evolución observada es la contraria.

La cilindridad por último no presenta una tendencia clara común ni en función de la profundidad (a_e) ni de la velocidad de rotación de la pieza (V_w). En función a la velocidad aumenta hasta los valores de profundidad de 40 y 80 μm en los cuales la tendencia obtenida muestra la cilindridad prácticamente constante con la velocidad. Respecto a la profundidad se observa como para las velocidad más baja la cilindridad aumenta con la profundidad, al contrario que las tendencias obtenidas en el resto de velocidades superiores.

Por otro lado, se observan ciertas peculiaridades en los resultados obtenidos, tales como los altos valores de tanto de redondez, cilindridad y rectitud obtenidos para los ensayos ejecutados a la profundidad de 20 μm , así como, la tendencia ascendente observada para las mediciones de estas propiedades en las secciones no rectificadas, es decir, torneadas en seco ($a_e = 0 \mu\text{m}$). Esto último se puede observar en las gráficas de la Figura 9.10, Figura 9.12 y Figura 9.16.

Estos resultados se asumen como indicativos de problemas o ineficiencias en el proceso, de rectificado – al menos en la ejecución de los ensayos a 20 μm – y de torneado en seco previo, pues los resultados deberían ser menos acusados y más parejos respectivamente. Así pues, se definen, al final de este capítulo, una serie de propuestas de mejoras a la metodología experimental en orden de poder obtener resultados de macrogeometría más claros y concisos.

10.1.3. Microdureza

Respecto a la microdureza se destaca que, para las diferentes operaciones realizadas tanto de rectificado como de torneado en seco, los valores medidos son, por lo general, bastante uniformes y próximos entre sí (ver Figura 9.17, Figura 9.18 y Figura 9.19), pudiéndose aproximar el valor medio a 400 HV. No obstante, si se puede señalar una

MEMORIA

influencia diferenciada sobre esta propiedad entre el proceso previo de torneado en seco y las diferentes operaciones de rectificado llevadas a cabo. Así pues se observa como la microdureza superficial de la pieza rectificada aumenta según se incremente la profundidad empleada en dicha operación (a_e) o la velocidad de rotación de la pieza (V_w). Sin embargo, respecto al torneado en seco, los valores de microdureza superficial obtenidos con el rectificado son inferiores a profundidades (a_e) y velocidades (V_w) iguales e inferiores a 20 μm y 230 r/min respectivamente.

La microdureza, como otras propiedades dependientes de la estructura física del material, se ven influenciadas por la temperatura. En los casos estudiados, el empleo de mayores profundidades (a_e) y mayores velocidades de rotación de la pieza (V_w), demuestran que además de una mayor tasa de eliminación de material, la deformación plástica así como el calor generado han sido suficientes como para verse afectada la microdureza superficial de la pieza de Ti6Al4V procesada.

Según otros estudios en los que se ha evaluado, una vez rectificada la pieza, la microdureza de la aleación Ti6Al4V en diferentes capas de la misma [53] y [54], demuestran que la microdureza superficial – la medida en nuestro caso – es superior a la medida en el resto del material. Esto es debido a que son tales capas superficiales las que reciben el esfuerzo ejercido por la herramienta, endureciéndose a causa de la deformación plástica que experimentan.

Por otro lado, este fenómeno puede considerarse además como indicativo de una posible concentración de tensiones residuales una vez rectificada la pieza, lo cual comprometería en gran medida la actuación de la misma. De hecho, como ya se explicase en la apartado 6.8, el gradiente de temperaturas sufrido por la superficie de la pieza, a consecuencia de la interacción con los granos abrasivos, da lugar a la sucesión de tensiones de compresión y tracción en las capas de tal superficie, desembocando en la concentración de tensiones residuales en la misma.

En cuanto al ensayo realizado a la profundidad de 20 μm y velocidad de rotación de 170 r/min, se destaca el paupérrimo valor de la microdureza superficial medida, igual a 306,5 HV. Suponiendo, como ya se comentara anteriormente, que en este ensayo ha existido un problema referente a la refrigeración durante el mismo, se entiende que, en este caso, las temperaturas alcanzadas han sido lo suficientemente altas como para haberse producido un revenido o reblandecimiento del material (ver apartado 6.5).

MEMORIA

10.2. Propuestas de mejora

En este apartado se exponen una serie de recomendaciones o consideraciones a tener en cuenta en la ejecución de la metodología experimental. Este apartado surge de la necesidad de mejorar dicho proceso experimental en base a los resultados inconformes obtenidos para los diferentes aspectos evaluados, más concretamente de los correspondientes a la macrogeometría de las piezas.

Tales recomendaciones y consideraciones propuestas son:

- Realización del avellanado de las caras laterales de la probeta asegurando la correcta sujeción y alineación de la misma entre el cabezal y el contrapunto, empleado como herramienta en esta operación de mecanizado.
- Controlar que la profundidad y diámetro máximo de los orificios generados con la operación de avellanado sean equivalentes [55].
- Limpiar el orificio generado de las posibles virutas acumuladas durante la ejecución de la operación de avellanado.
- Comprobar - y evitar dentro de lo posible - que tanto el torno horizontal como la rectificadora cilíndrica no experimenten vibraciones durante su puesta en marcha.
- Comprobar el estado del cabezal y contrapunto correspondientes a los equipos empleados, torno horizontal y rectificadora cilíndrica.
- Llevar a cabo un diamantado o reavivado de la muela o disco de abrasivo a la suficiente profundidad y con las suficientes pasadas como para asegurar el reavivado y alisado prácticamente uniforme en todo el ancho de la muela.
- Realizar una pasada de diamantado previo a la realización de cada ensayo ejecutado a diferentes profundidades de rectificado (a_e).
- Comprobar el estado de la manguera encargada de suministrar el fluido de rectificado, así como comprobar la refrigeración y lubricación adecuada de la superficie de contacto entre pieza y muela de abrasivo.

Junto a estas recomendaciones se recuerdan algunas de las ya tenidas en cuenta en la metodología experimental descrita en el Capítulo 8 Metodología experimental. Algunas de estas precauciones y acciones son la limpieza de los contrapuntos, la correcta sujeción del perrillo de arrastre, comprobación “punta con punta” entre contrapunto y herramienta de torneado (ver Figura 8.6) o el empleo de una herramienta distinta, sin usar previamente, para el acabado de cada probeta. Respecto a esto último, y teniendo en cuenta la comparativa realizada en la Figura 8.9, se puede considerar el empleo además de una herramienta sin usar previamente, en el acabado de los diferentes tramos de la probeta, aún a pesar de la reducción de la eficiencia económica.

MEMORIA

10.3. Líneas futuras

En este apartado se proponen una serie de líneas futuras que sirvan como posibles puntos de partida para posteriores proyectos o trabajos. Estas han surgido bien de aquellas variables que no han entrado dentro del alcance del este trabajo pero cuyo estudio puede ser de gran interés, o bien de aquellos puntos de mejora del estudio realizado en este trabajo, según lo expuesto en apartados anteriores.

- Estudiar las tensiones residuales de la pieza una vez rectificadas, en relación al análisis realizado de la microdureza superficial, pues es este uno de los puntos críticos de este tipo de mecanizado abrasivo.
- Ensayar a tracción probetas rectificadas con objeto de comprobar si el rectificado afecta a las propiedades mecánicas del material.
- Evaluar la vida útil de la herramienta – muela de abrasivo – mecanizando tramos de mayor longitud a diferentes parámetros de corte.
- Evaluar influencia de la velocidad de avance en rectificado, bien longitudinal o transversal.
- Evaluar la influencia de la herramienta o muela de abrasivo: abrasivo empleado, velocidad de rotación o ancho de la misma.
- Evaluar la influencia de la refrigeración en el proceso: incidencia del refrigerante, ausencia de refrigerante y tipo de refrigeración (convencional, MQL, criogénica).

MEMORIA

11. Referencias bibliográficas

- [1]. C. Romero, «Metodología para el estudio de la influencia del mecanizado en la respuesta a la tracción de la aleación UNS A92050-T84 (Al-Cu-Li), » Trabajo Fin de Grado, Universidad de Cádiz, Cádiz (España), 2015.
- [2]. J. Trullén y M. Lucena, «Plan estratégico para el sector aeronáutico español en el periodo 2008-2016,» *Centro para el desarrollo tecnológico industrial*, 2007.
- [3]. S. Pozzi, 11 Enero 2017. [En línea]. Available: http://economia.elpais.com/economia/2017/01/11/actualidad/1484131901_632414.html.. [Último acceso: 9 Junio 2017].
- [4]. A. González, «El País Web site,» 20 Marzo 2016. [En línea]. Available: http://economia.elpais.com/economia/2016/03/18/actualidad/1458328069_481275.html. [Último acceso: 9 Junio 2017].
- [5]. Asociación Española de Empresas Tecnológicas de Defensa, Aeronáutica y Espacio (tedae), «Retos del Sector Aeronáutico en España. Guía Estratégica 2015-2025».
- [6]. AeroSpace and Defence (ASD), «Facts & Figures, » *Industries Association of Europe*, 2015.
- [7]. Asociación Española de Empresas Tecnológicas de Defensa, Aeronáutica y Espacio (tedae), [En línea]. Available: https://www.tedae.org/uploads/old/files/1436341394_aeronautico.pdf
- [8]. Fundación Hélice, «Sector Aeroespacial Andaluz Informe 2015,» [En línea]. Available: http://helicecluster.com/sites/helicecluster.com/files/pdf/informe_sector_aeroespacial_andaluz_2015.pdf. [Último acceso: 10 Junio 2017].
- [9]. Aerospace & Defence Meetings (ADM) Sevilla 2016. «Galería de imágenes del A400M,» 2016 [En línea]. Available: <https://extendaplus.es/aeroespacial/2013/05/18/galeria-de-imagenes-del-a400m/>. [Último acceso: 10 Junio 2017].
- [10]. L. Calvo, «Airbus A350 XWB, primer estabilizador horizontal en producción,» Flynews, 24 Octubre 2011. [En línea]. Available: <http://fly-news.es/industria/airbus-a350-xwb-primer-estabilizador-horizontal-en-produccion/>.. [Último acceso: 10 Junio 2017].
- [11]. «Projects, Airbus A350 XWB Belly Fairing,» Ghenova.com, [En línea]. Available: <http://www.ghenova.com/es/proyectos/64-airbus-a350-xwb-belly-fairing?iij=1497133009780>. [Último acceso: 10 Junio 2017].
- [12]. R. Urizar, «Materiales de alto rendimiento para el sector más exigente,» 10 Octubre 2012. [En línea]. Available: <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/101083-Materiales-de-alto-rendimiento-para-el-sector-mas-exigente.html>. [Último acceso: 11 Junio 2017].

MEMORIA

- [13]. P. F. Mayuet, M. Álvarez y M. Marcos, «Tecnologías para el taladrado de materiales aeronáuticos avanzados,» 15 Octubre 2012. [En línea]. Available: <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/101182-Tecnologias-para-el-taladrado-de-materiales-aeronauticos-avanzados.html>. [Último acceso: 10 Junio 2017].
- [14]. M. Geraldine y M. Galindo. «Propiedades de los materiales utilizados en el sector aeronáutico,» 2013.
- [15]. G. E. Totten y D. S. Mackenzie, «Handbook of Aluminum, » Primera ed., *Marcel Dekker Inc*, New York (EEUU), 2003.
- [16]. I. Inagaki, T. Takechi, Y. Shirai y N. Ariyasu, «Application and Features of Titanium for the Aerospace Industry,» *Nippon steel & Sumitomo metal technical report*, nº 10, 2014.
- [17]. ScienceDirect.com | Science, health and medical journals, «full text articles and books». [En línea]. Available: <http://www.sciencedirect.com>. [Último acceso: 11 Junio 2017].
- [18]. L. Castro, «Titanio: El metal más resistente de la industria,» *metalactual*.
- [19]. «Grupo de investigación de INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS DE MATERIALES Y FABRICACIÓN de la UCA». [En línea]. Available: <http://tep027.uca.es>. [Último acceso: 11 Junio 2017].
- [20]. Oferta Científica, Tecnológica y Humanística de la universidad de Cádiz, Grupo TEP-027. [En línea]. Available: <http://cth.uca.es/esp/grupos/tecnologias-de-la-produccion/1/ingenieria-y-tecnologias-de-materiales-y-fabricacion>. [Último acceso: 11 Junio 2017].
- [21]. M. Vera y J. Nuñez, «Oxidación térmica de la aleación Ti-6Al-4V en atmósfera de aire y de oxígeno electrolítico. primeros avances,» de *Encuentro de Jóvenes Investigadores en Ciencia y Tecnología de Materiales*, Argentina, 2008.
- [22]. R. A. Wood, J. A. Gurklis, C. T. Olofson, D. E. Strohecker y D. G. Howden, «Aircraft designer's handbook for Titanium and Titanium alloys,» Ohio (EEUU), 1967.
- [23]. C. Leyens y M. Peters, «Titanium and Titanium Alloys; Fundamentals and Applications,» Primera ed., *WILEY-VCH*, Köln (Alemania), 2003.
- [24]. ASM Aerospace Specification Metals Inc. [En línea]. Available: <http://asm.matweb.com/>, . [Último acceso: 20 Junio 2017].
- [25]. C. Olson, F. Boulger y J. Gurklis, «Machining and Grinding of Titanium and its alloys,» NASA George C. Marshall Space Flight Center, Huntsville, (Alabama), 1965.
- [26]. S. Kalpakjian y S.R. Schmid. «Manufactura, ingeniería y tecnología,» Quinta ed., *Pearson Educación*, México, 2008.

MEMORIA

- [27]. H. El-Hofy, «Fundamentals of Machining Processes. Conventional and Nonconventional Processes,» Segunda ed., *Taylor & Francis*, Danvers (Massachusetts), 2014.
- [28]. Sandvick Coromant, «El Mecanizado Moderno. Manual práctico,» Primera ed., *Sandvick Coromant*, 1994.
- [29]. M.B. Ponce, Tesis doctoral. «Caracterización de los mecanismos de adhesión secundaria y su influencia en el desgaste de herramientas de corte. Aplicación al mecanizado en seco de aleaciones ligeras,» Cádiz (España), 2013.
- [30]. A. Shokrani, V. Dhokia y S. Newmann, «Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids,» *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 57, pp.83–101, 2012.
- [31]. J.A. Schey. «Procesos de manufactura,» Tercera ed., *McGraw Hill Interamericana*, México, 2002.
- [32]. H. Appold, K. Feiler, A. Reinhard y P. Schmidt, «Tecnología de los metales para profesiones técnico-mecánicas,» *Editorial Reverté*, Barcelona (España), 1984.
- [33]. Universidad del País Vasco. Departamento de Ingeniería Mecánica. «Tecnología mecánica. Módulo III: Mecanizado por arranque de viruta. Tema 13: Rectificado».
- [34]. S. Malkin y C. Guo. «Grinding Technology. Theory and Applications of Machining with Abrasives,» Segunda ed., *Industrial Press*, Nueva York (EEUU), 2008.
- [35]. Universidad de Cádiz. Máster Oficial en Ingeniería de Fabricación. «Tema 1: Rectificado de Alto Rendimiento: Aspectos Generales»
- [36]. C. Yang, J. Xu, W. Ding, Z. Chen y Y. Fu, «Dimension Accuracy and Surface Integrity of Creep Feed Ground Titanium Alloy with Monolayer Brazed CBN Shaped Wheels,» *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 23, n° 5, pp. 585–590, 2010.
- [37]. Aubert & Duval, «Hoja de especificaciones de la aleación de acero FDMA,» Aubert & Duval Web site, [En línea]. Available: http://www.aubertduval.com/uploads/tx_obladygestionproduit/FDMA_GB.pdf. [Último acceso: 9 Julio 2017].
- [38]. M. Ghahramani Nik, M. R. Movahhedy y J. Akbari, «Ultrasonic-Assisted Grinding of Ti6Al4V Alloy,» *Procedia CIRP*, vol. 1, pp. 353–358, 2012.
- [39]. F. Barragán, C. Rojas, J. Ortiz y W. Álvarez, «Exposición sobre el rectificado». *Escuela Colombiana de Carreras Industriales*.
- [40]. Norma ISO 4287. «Especificación geométrica de productos (GPS). Calidad superficial: Método del perfil. Términos, definiciones y parámetros del estado superficial». Agosto, 1998.

MEMORIA

- [41]. Norma UNE-EN ISO 12180:2011. «Especificación geométrica de productos (GPS). Cilindricidad. Partes 1 y 2». Febrero, 2012
- [42]. Norma UNE-EN ISO 12181:2011. «Especificación geométrica de productos (GPS). Redondez. Partes 1 y 2». Febrero, 2012
- [43]. Norma UNE-EN ISO 12780:2011. «Especificación geométrica de productos (GPS). Rectitud. Partes 1 y 2». Junio, 2012.
- [44]. ASTM E 92 – 82:2003. R03. «Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials»
- [45]. ASTM E 384 – 99. R01. «Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials».
- [46]. D. Arola, M. McCain, S. Kunaporn y M. Ramulu. «Waterjet and abrasive waterjet surface treatment of titanium: a comparison of surface texture and residual stress,» *Wear*, vol. 249, nº 10–11, pp. 943–950, Noviembre 2011.
- [47]. G. Fowler, I. Pashby y P. Shipway, «The effect of particle hardness and shape when abrasive water jet milling titanium alloy Ti6Al4V,» *Wear*, vol. 266, nº 7–8, pp. 613–620. Noviembre 2011.
- [48]. «Rectificadora cilíndrica universal RCE750, Heller Máquina – Herramienta S.L.© » Manual de instrucciones, 2014.
- [49]. B. Sebastien, «Validation de l'huile MECAGREEN 450 AERO de CONDAT,» 2013.
- [50]. Norma UNE EN ISO 4288. «Especificación geométrica de producto (GPS). Calidad superficial: Método del perfil. Reglas y procedimientos para la evaluación del estado superficial. » Julio, 2008.
- [51]. M. Iglesias, «Estado del arte del rectificado de titanio y puesta a punto de la rectificadora RCE750, » Trabajo Fin de Grado, Universidad de Cádiz, Cádiz (España), 2016.
- [52]. J. Elanchezhian, M. Pradeep Kumar y G. Manimaran, «Grinding titanium Ti–6Al–4V alloy with electroplated cubic boron nitride,» *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 29, nº 11, pp. 4885–4889, Noviembre 2015.
- [53]. H. Wenguo, X. Jiuhua, F. Yucan y S. Honghua, «Dry grinding of Ti6Al4V alloy with flap wheels,» *Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, vol. 29, nº 2, Junio 2010.
- [54]. W. Huo, J. Xu, Y. Fu y H. Qi, «Investigation of Surface Quality on Dry Belt Grinding of Ti6Al4V Alloy,» *Materials Science Forum*, vol. 698, pp. 133–136, Septiembre 2011.
- [55]. H. Kato, Y. Nakano y K. Nakayama, «Transfer of Roundness Error from Center and Center Hole to Workpiece in Cylindrical Grinding and its Control,» *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, vol. 34, nº 1, pp. 287–290, 1985.



Anexos

ANEXOS

Anexos

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO I	166
Guía simple sobre las aleaciones de titanio y sus aplicaciones	
ANEXO II	168
Propiedades mecánicas de los grados ASTM	
ANEXO III	169
Elementos estabilizadores para fases α y β para titanio	
ANEXO IV	170
Procesos de mecanizado para aleaciones de titanio	
ANEXO V	172
Tabla de especificaciones y parámetros principales de la rectificadora RCE750	
ANEXO VI	174
Gráfico de elementos de funcionamiento de la rectificadora RCE750	
ANEXO VII	178
Tabla resumen e informes de resultados de rugosidad	
ANEXO VIII	244
Tabla resumen e informes de resultados de macrogeometría	
ANEXO IX	294
Tabla resumen de resultados de microdureza	

ANEXOS

ANEXO I

Guía simple sobre las aleaciones de titanio y sus aplicaciones [25]

Tipo de aleación	Valores mínimos de resistencia a la tracción (Mpa)		Características durante el tratamiento de la aleación				Aplicaciones
	última	límite	Resistencia a la propagación de grieta durante forja	Conformado de chapa	Soldabilidad	¿Tratamiento térmico para aumentar la resistencia?	
Sin aleantes	345 450 550	275 380 480	Excelente	Excelente	Excelente	No	Válvulas de control hidráulico, fittings, soportes para uniones, rigidizadores para la piel del fuselaje
Ti-5Al-2.5Sn	830	790	Medio a bueno	Medio	Excelente	No	Transmisión y carcasa de motor, montajes del compresor de motores a reacción, dispositivos hipersustentadores de borde de ataque
Ti-8Al-1Mo-1V	900-930	830-860	Medio	Medio	Bueno	No	Álabes del compresor y carcasas, piel interior y cuernas del fuselaje, mamparos de presión
Ti-6Al-4V	900	830	Bueno	Bueno		Sí	

ANEXOS

	Tras maduración				Medio a bueno		Álabes del compresor, estructuras del tren de aterrizaje, fasteners, fittings, soportes, rigidizadores, largueros, cuadernas
	1170	1100					
Ti-6Al-6V-2Sn	1030	965	Bueno	–	Pobre	Sí	Fasteners, toma de aire, elementos estructurales
	Tras maduración						
	1240	1170					
Ti-13V-11Cr-3Al	895	860	Medio	Medio	Medio a pobre	Sí	Elementos estructurales, largueros, pieles, cuadernas, soportes, fasteners
	Tras maduración						
	1200	1135					
Ti-2.25Al-11Sn-5Zr-1Mo	1000	895	Medio a bueno	–	–	Sí	Álabes de motores, separadores, fuselaje, fasteners
	Tras maduración						
	1240	1100					
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	895	825	Bueno	Bueno	Medio a bueno	No	Álabes de motores, separadores, ensamblajes del compresor, componentes del fuselaje
Ti-4Al-3Mo-1V	860	790	Bueno	Bueno	Medio a pobre	Sí	Componentes del fuselaje
	Tras maduración						
	1240	1070					

ANEXOS

ANEXO II

Propiedades mecánicas de los grados ASTM [18]

Grado 1 No aleado	Empleado cuando se requiere máxima conformabilidad y es necesario reducir los contenidos de hierro y de elementos intersticiales, con el fin de aumentar la resistencia a la corrosión. Posee también buenas propiedades para contrarrestar el efecto de bajas temperaturas. Poca resistencia mecánica por lo que su uso es limitado
Grado 2 Aleación de hierro y titanio	El grado 2 posee resistencia a la tracción de 345 MPa y una dureza de 82 HRB, lo cual significa alta resistencia a la corrosión y conformabilidad. Posee una ductilidad del 20%, lo que garantiza que se pueda soldar. También presenta un porcentaje bajo en impurezas.
Grados 3 y 4 No aleados	La combinación de estos grados produce el titanio puro comercial (composición superior al 99%). Aunque es utilizado en aplicaciones que requieren resistencia a la corrosión, pierde su resistencia mecánica a temperaturas elevadas.
Grados 5 y 9	Son aleaciones de titanio, aluminio y vanadio de gran resistencia a la corrosión, pero con un nivel medio en cuanto a resistencia mecánica. El grado 5 posee una buena soldadura y resistencia eléctrica, de allí su aplicación en el área biomédica y aeroespacial.
Grados 7, 11 y 12	Estos grados también alean titanio, aluminio y vanadio. Ofrecen buena resistencia a la corrosión para aplicaciones en la industria de procesamiento químico.
Ti β - C	Aleación con alta resistencia a la corrosión y temperatura, por lo que se usa principalmente en el sector naval.

ANEXOS

ANEXO III

Elementos estabilizadores para fases α y β para titanio [23]

α and β - stabilizing elements

		no solubility		low solubility																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
--	--	---------------	--	----------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

ANEXOS

ANEXO IV

Procesos de mecanizado para aleaciones de titanio [18]

Técnica	Descripción
<i>Embutición</i>	Normalmente, se utiliza en titanio grado 5 por sus propiedades dúctiles. La técnica consiste en colocar la pieza a moldear entre las dos mitades del troquel a una temperatura que permita la plasticidad del material. Posteriormente, se insufla argón caliente en la parte superior del molde y se fuerza la lámina de titanio contra la parte interior del troquel. Este procedimiento se recomienda para lotes de piezas grandes, con la ventaja del corto tiempo de conformado
<i>Fresado químico</i>	Consiste en sumergir la pieza de titanio en una solución de 120–190 g/l de ácido hipofluórico, manteniendo la temperatura de la solución en 300–400°C, de esta manera, el metal pierde masa a una velocidad aproximada de 0,02 mm/minuto. Las zonas de la pieza que no deben ser atacadas, deben protegerse con una capa de elastómero de neopreno o un material similar. Con esta técnica se obtiene buenos acabados.
<i>Taladrado</i>	Para esta técnica se deben utilizar brocas de acero súper rápido (HSS) a fin de lograr un taladrado más preciso. También se recomienda que las brocas estén afiladas, limpias, que tengan longitud suficiente para obtener la dimensión deseada del agujero y para que las virutas se expulsen fácilmente.
<i>Escariado</i>	Dado que se trata de obtener un acabado fino y preciso en agujeros previamente taladrados, debe emplearse una broca estándar de acero rápido o carburo, de un diámetro ligeramente inferior al del agujero que se quiere conseguir. Se recomienda practicar escariados con un número de estrías que aseguren espacio de desahogo suficiente entre los dientes, para la expulsión de las virutas.
<i>Soldadura por fusión</i>	En esta práctica debe controlarse que la pieza de titanio no supere la temperatura de fusión, ya que puede reaccionar al contacto con los gases atmosféricos y sufrir una decoloración, aspecto que denota pérdida de ductibilidad, dureza y resistencia a la tracción. Para evitar estas reacciones, es necesario proteger en gas inerte (argón) las piezas de titanio. También hay que procurar mantener el ambiente limpio para evitar las impurezas que ocasionen porosidades en las piezas

ANEXOS

<i>Fundición</i>	Recomendable cuando el diseño complejo haga difícil el forjado o el mecanizado de una pieza. Como el titanio tiende a reaccionar con numerosos materiales, se recurre a la fundición por moldeo de grafito o a la cera perdida, método apropiado para fundir piezas pequeñas, con acabados de alta calidad. Se producen piezas de fundición de hasta 600 kg tanto en titanio puro comercial como en cada una de sus aleaciones.
------------------	---

ANEXOS

ANEXO V

Tabla de especificaciones y parámetros principales de la rectificadora RCE750 [48]

Parámetros técnicos principales	520	750	1000
Rango diametral de la base	8~200mm		
Rango de perforación de la base	13~80mm		
Máx. longitud de la base	520mm	750mm	1000mm
Máx. profundidad de la base	125mm		
Distancia entre ejes	520mm	750mm	1000mm
Altura del eje	125mm		
Peso máx. de la pieza de trabajo	50kg		
Distancia desde la base del soporte de la máquina hasta el eje de trabajo	~1072mm		
Dimensiones exteriores de la máquina (largo x ancho x altura)	~2000x1420x1600mm		
Peso de la máquina	2400kg	2800kg	3000kg
Mesa de trabajo			
Desplazamiento máximo	600mm	800mm	1080mm
Desplazamiento de la mesa de trabajo por cada revolución del rodillo	6mm		
Velocidad de avance hidráulico	0,1~4m/min		
Máx. ángulo de inclinación de la parte superior de la mesa.	-5°~+9°	-3°~+9°	-3°~+7°
Cabeza de la rueda			
Máx. Desplazamiento	150mm		
Desplazamiento rápido	20mm		
Periodo desplazamiento rápido	≤3s		
Desplazamiento del cabezal por cada revolución del volante	1mm		
Desplazamiento del cabezal por cada división del pomo de micro ajuste	0,00125mm		
Velocidad de rotación del husillo	1820 rpm		
Velocidad exterior de la rueda de máximo diámetro (zona de contacto con la pieza de trabajo)	35m/s		
Tamaño de rueda	400x40x203		
Accesorio pulido interno			

ANEXOS

<i>Velocidad de rotación del husillo</i>	13000r/min
Cabezal de trabajo	
<i>Velocidad de rotación del husillo</i>	60 85 230 120 170 460r/min
<i>Cono interior de la nariz del husillo</i>	Morse #3
<i>Diámetro del mandril</i>	125mm
Contrapunto	
<i>Máx. desplazamiento del manguito central</i>	25mm
<i>Manguito central de sujeción</i>	#3
Sistema hidráulico	
<i>Presión de trabajo</i>	0,8~1MPa
<i>Tasa de flujo de la bomba</i>	25L/min
<i>Presión de la bomba</i>	2,5MPa
Sistema de enfriamiento	
<i>Caudal de la bomba enfriadora</i>	25L/min

ANEXOS

ANEXO VI

Gráfico de elementos de funcionamiento de la rectificadora RCE750 [48]

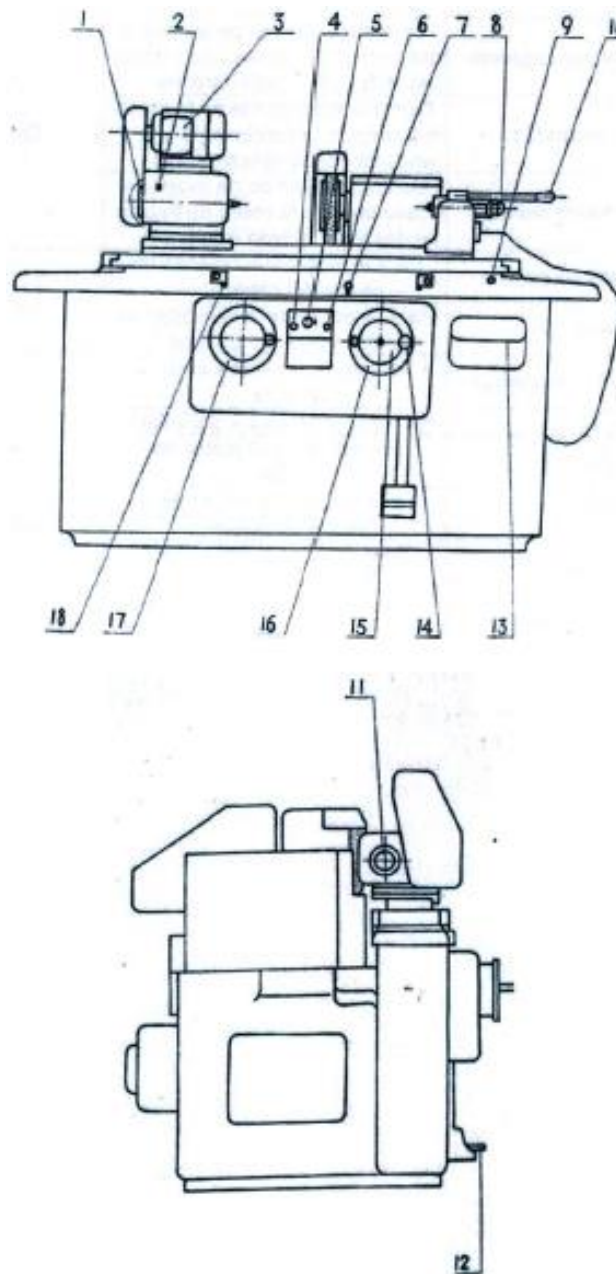


Figura A. 1. Partes de la rectificadora RCE750 [48]

ANEXOS

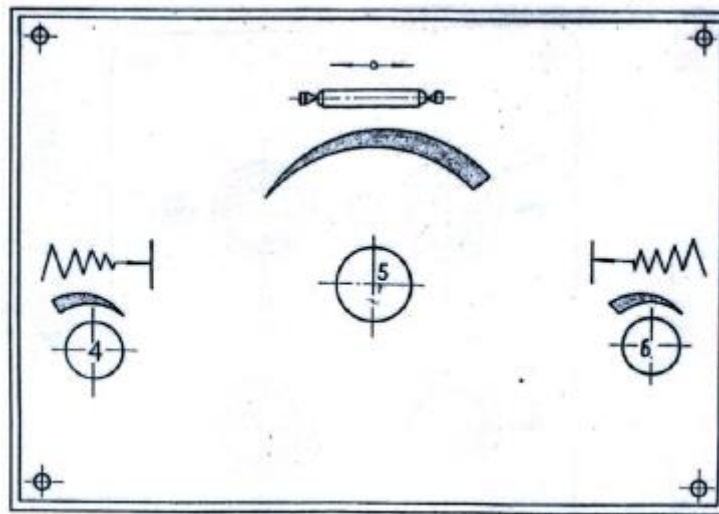


Figura A. 2. Panel de control hidráulico [48]

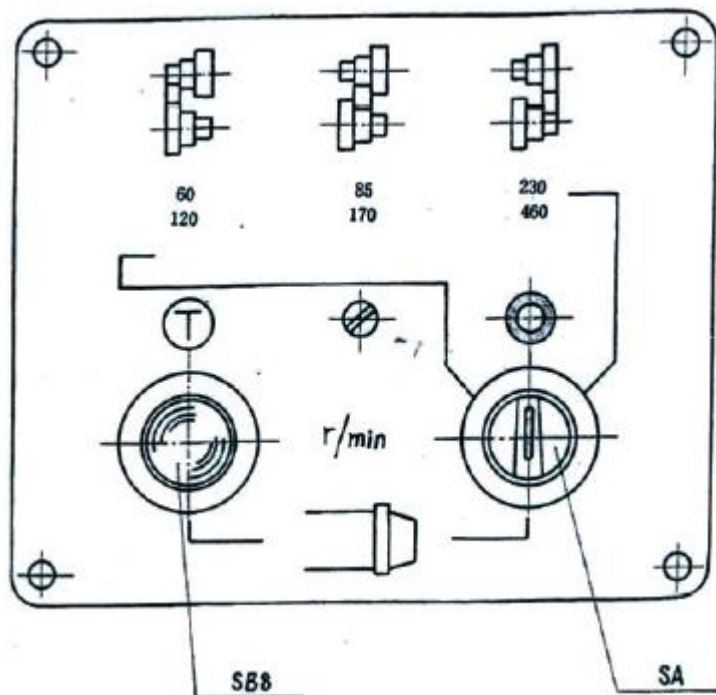


Figura A. 3. Panel de control eléctrico del cabezal [48]

ANEXOS

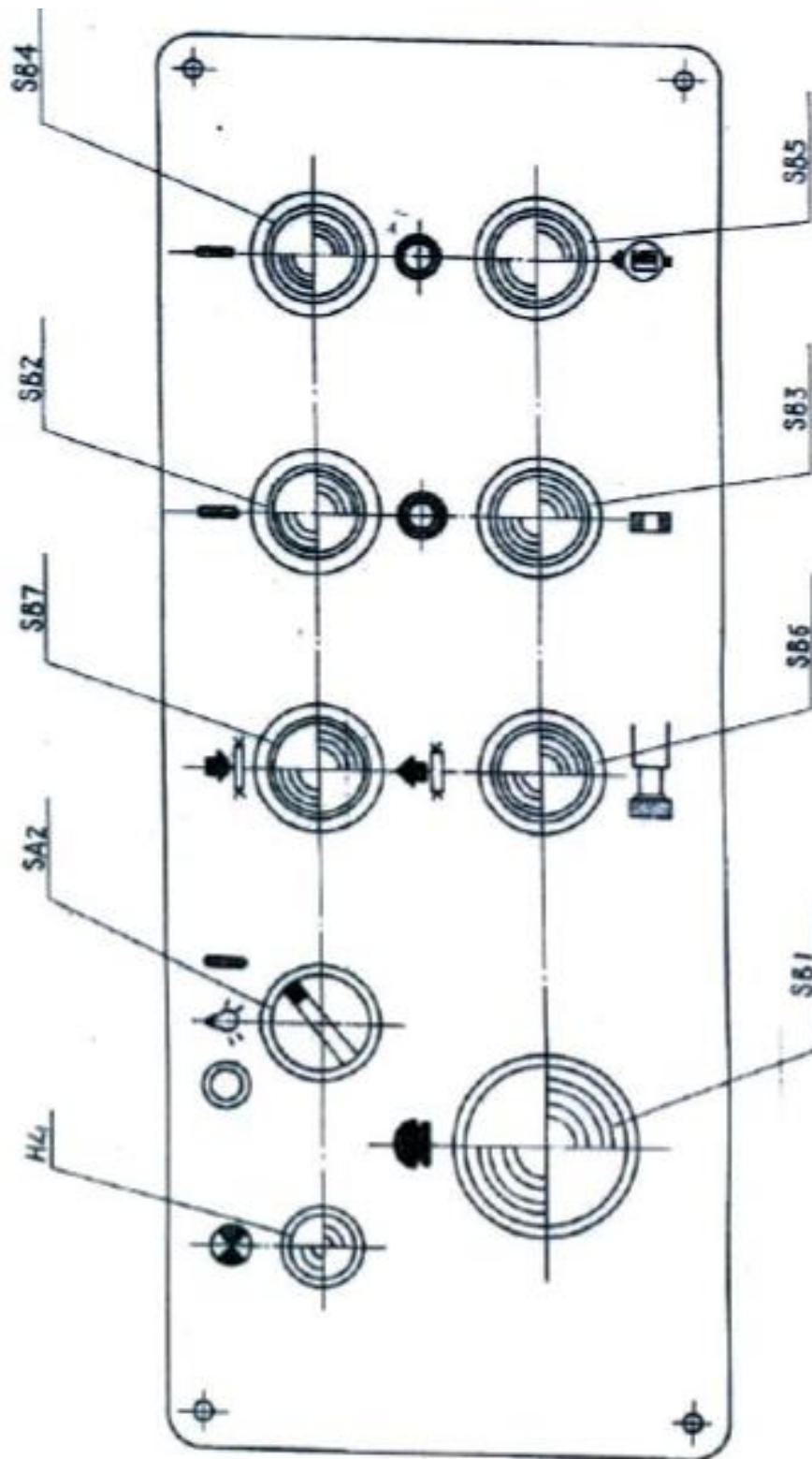


Figura A. 4. Diagrama del panel de control eléctrico [48]

ANEXOS

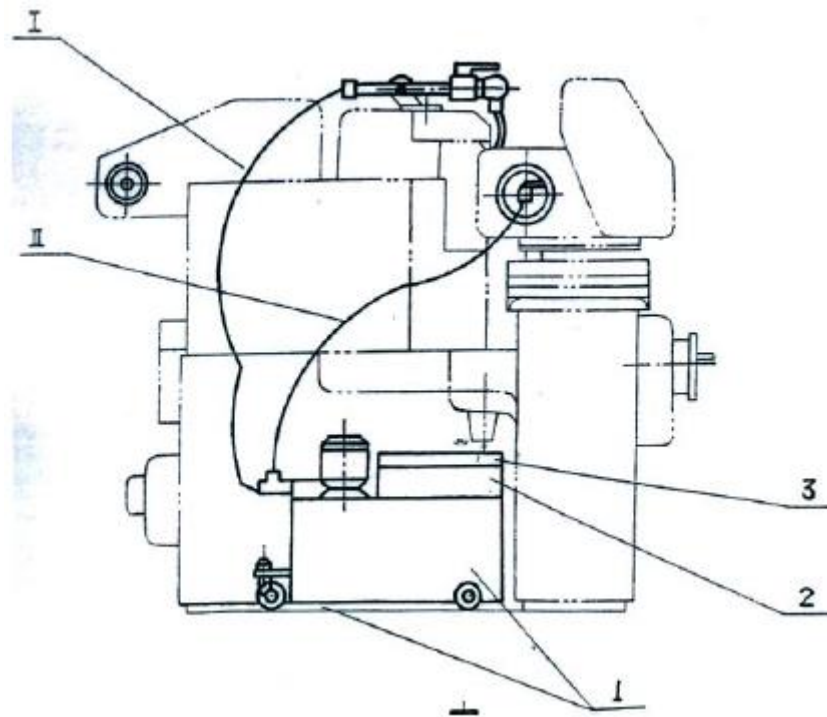


Figura A. 5. Diagrama del sistema de enfriamiento [48]

ANEXOS

ANEXO VII


Tabla donde se representa una medición obtenida por generatriz, correspondientes a cada ensayo, así como los informes obtenidos para estas mediciones.

Ensayo	Generatriz	Parámetros de rugosidad				
		Ra	Rz	Rq	Rp	R Sm
TiVw60ae0	G1	0,57 μm	3,17 μm	0,71 μm	1,58 μm	176,45 μm
	G2	0,46 μm	2,75 μm	0,58 μm	1,29 μm	-- μm
	G3	0,58 μm	3,16 μm	0,73 μm	1,38 μm	248 μm
	G4	0,55 μm	3,2 μm	0,68 μm	1,73 μm	181,19 μm
TiVw60ae20	G1	0,29 μm	2,69 μm	0,38 μm	1,4 μm	-- μm
	G2	0,35 μm	2,36 μm	0,44 μm	1,05 μm	-- μm
	G3	0,35 μm	2,4 μm	0,43 μm	1,02 μm	-- μm
	G4	0,38 μm	2,61 μm	0,47 μm	1,19 μm	-- μm
TiVw60ae40	G1	0,29 μm	2,37 μm	0,37 μm	1,14 μm	-- μm
	G2	0,33 μm	2,35 μm	0,42 μm	1,06 μm	-- μm
	G3	0,37 μm	2,8 μm	0,47 μm	1,21 μm	-- μm
	G4	0,37 μm	2,53 μm	0,46 μm	1,08 μm	-- μm
TiVw60ae80	G1	0,29 μm	2,12 μm	0,38 μm	0,97 μm	-- μm
	G2	0,36 μm	2,64 μm	0,46 μm	1,09 μm	-- μm
	G3	0,32 μm	2,7 μm	0,4 μm	1,06 μm	-- μm
	G4	0,36 μm	2,38 μm	0,45 μm	1,15 μm	-- μm
TiVw170ae0	G1	0,53 μm	3,21 μm	0,66 μm	1,67 μm	180,32 μm
	G2	0,42 μm	2,34 μm	0,53 μm	1,11 μm	-- μm
	G3	0,46 μm	2,54 μm	0,56 μm	1,44 μm	-- μm
	G4	0,55 μm	3,18 μm	0,68 μm	1,79 μm	170,85 μm
TiVw170ae20	G1	0,95 μm	8,01 μm	1,31 μm	3,17 μm	90,98 μm
	G2	1,15 μm	7,22 μm	1,42 μm	3,64 μm	94,12 μm
	G3	0,55 μm	4,05 μm	0,7 μm	2,07 μm	60,78 μm
	G4	0,77 μm	6,14 μm	1,01 μm	3,22 μm	76,98 μm
TiVw170ae40	G1	0,21 μm	1,86 μm	0,27 μm	1,07 μm	-- μm
	G2	0,2 μm	1,85 μm	0,27 μm	1,04 μm	-- μm
	G3	0,2 μm	2,04 μm	0,28 μm	1,2 μm	-- μm
	G4	0,26 μm	2,45 μm	0,35 μm	1,43 μm	-- μm
TiVw170ae80	G1	0,27 μm	2,46 μm	0,36 μm	1,34 μm	-- μm
	G2	0,27 μm	2,2 μm	0,35 μm	1,15 μm	-- μm
	G3	0,27 μm	2,17 μm	0,34 μm	1,15 μm	-- μm

ANEXOS

	G4	0,24 μm	1,92 μm	0,3 μm	1,05 μm	-- μm
TiVw230ae0	G1	0,36 μm	2,09 μm	0,45 μm	1,03 μm	-- μm
	G2	0,42 μm	2,72 μm	0,55 μm	1,6 μm	-- μm
	G3	0,47 μm	2,63 μm	0,58 μm	1,52 μm	-- μm
	G4	0,44 μm	2,61 μm	0,56 μm	1,38 μm	-- μm
TiVw230ae20	G1	0,22 μm	1,9 μm	0,32 μm	1,21 μm	-- μm
	G2	0,14 μm	1,47 μm	0,19 μm	0,66 μm	-- μm
	G3	0,51 μm	3,57 μm	0,65 μm	1,77 μm	51,99 μm
	G4	0,18 μm	2,07 μm	0,27 μm	0,85 μm	-- μm
TiVw230ae40	G1	0,16 μm	1,67 μm	0,21 μm	1,02 μm	-- μm
	G2	0,18 μm	1,97 μm	0,25 μm	1,16 μm	-- μm
	G3	0,2 μm	2,1 μm	0,27 μm	0,83 μm	-- μm
	G4	0,19 μm	1,5 μm	0,25 μm	0,8 μm	-- μm
TiVw230ae80	G1	0,18 μm	1,45 μm	0,22 μm	0,74 μm	-- μm
	G2	0,22 μm	1,78 μm	0,28 μm	0,8 μm	-- μm
	G3	0,25 μm	1,9 μm	0,32 μm	0,91 μm	-- μm
	G4	0,22 μm	1,67 μm	0,27 μm	0,85 μm	-- μm
TiVw460ae0	G1	0,68 μm	3,84 μm	0,84 μm	2,17 μm	170,81 μm
	G2	0,46 μm	2,95 μm	0,58 μm	1,65 μm	-- μm
	G3	0,52 μm	2,92 μm	0,65 μm	1,53 μm	202,89 μm
	G4	0,71 μm	3,51 μm	0,87 μm	1,75 μm	180,81 μm
TiVw460ae20	G1	0,37 μm	2,91 μm	0,47 μm	1,55 μm	-- μm
	G2	0,39 μm	2,84 μm	0,49 μm	1,44 μm	-- μm
	G3	0,4 μm	3,63 μm	0,54 μm	2,02 μm	-- μm
	G4	0,44 μm	3,44 μm	0,57 μm	1,82 μm	-- μm
TiVw460ae40	G1	0,59 μm	4,05 μm	0,74 μm	1,84 μm	60,18 μm
	G2	0,53 μm	3,92 μm	0,66 μm	1,89 μm	43,97 μm
	G3	0,57 μm	4,39 μm	0,73 μm	2 μm	59,97 μm
	G4	0,55 μm	4,12 μm	0,71 μm	2,12 μm	53,2 μm
TiVw460ae80	G1	0,86 μm	6,01 μm	1,09 μm	3,07 μm	60,09 μm
	G2	0,82 μm	5,44 μm	1,03 μm	2,69 μm	61,13 μm
	G3	0,82 μm	5,44 μm	1,03 μm	2,55 μm	73,01 μm
	G4	0,82 μm	5,52 μm	1,03 μm	2,63 μm	73,82 μm


ANEXOS



Universidad
de Cádiz

PROBETAS PARA ENSAYO DE RECTIFICADO
Ti6Al4V

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



Fecha, hora: 22.03.2000, 21:15
Observación: TiVw60ae0G1
PIEZA: Cilindro Ti6Al4V-Vw= 60 r/min

INSPECTOR: Fernando Sánchez Artola
EQUIPO: Mahr PERTHOMETER PGK 120
PALPADOR: MFW-250

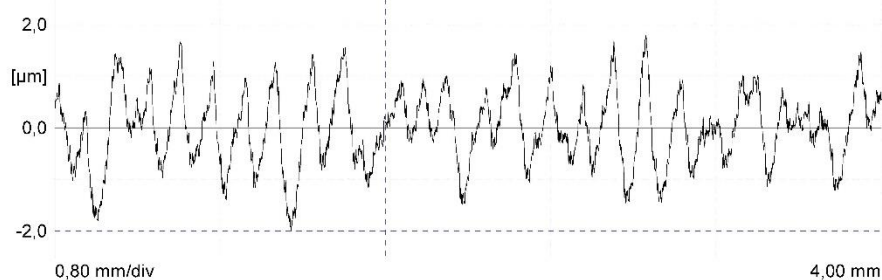
CONDICIONES DE EXPLORACIÓN

LS	2,5	μm
LT	5,60	mm
LM	4,00	mm
Z	5	
VB	±250,0	μm

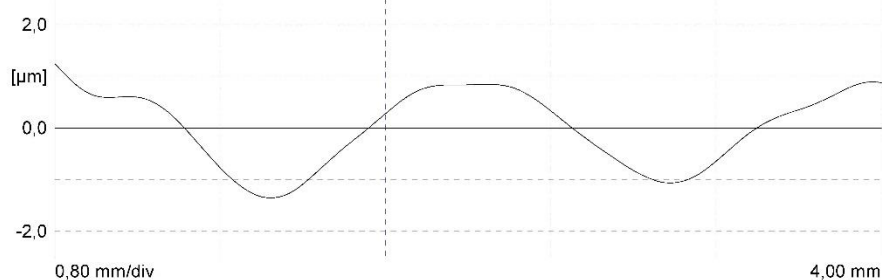
PARÁMETROS DE RUGOSIDAD

Ra	0,57	μm
Rz	3,17	μm
Rq	0,71	μm
Rp	1,58	μm
R Sm	176,45	μm

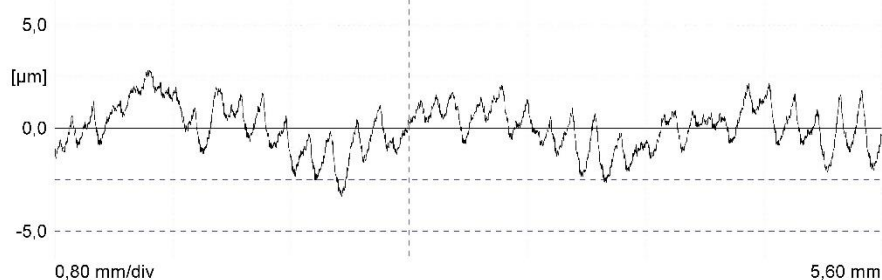
Perfil: R [LC GS 0,80 mm]



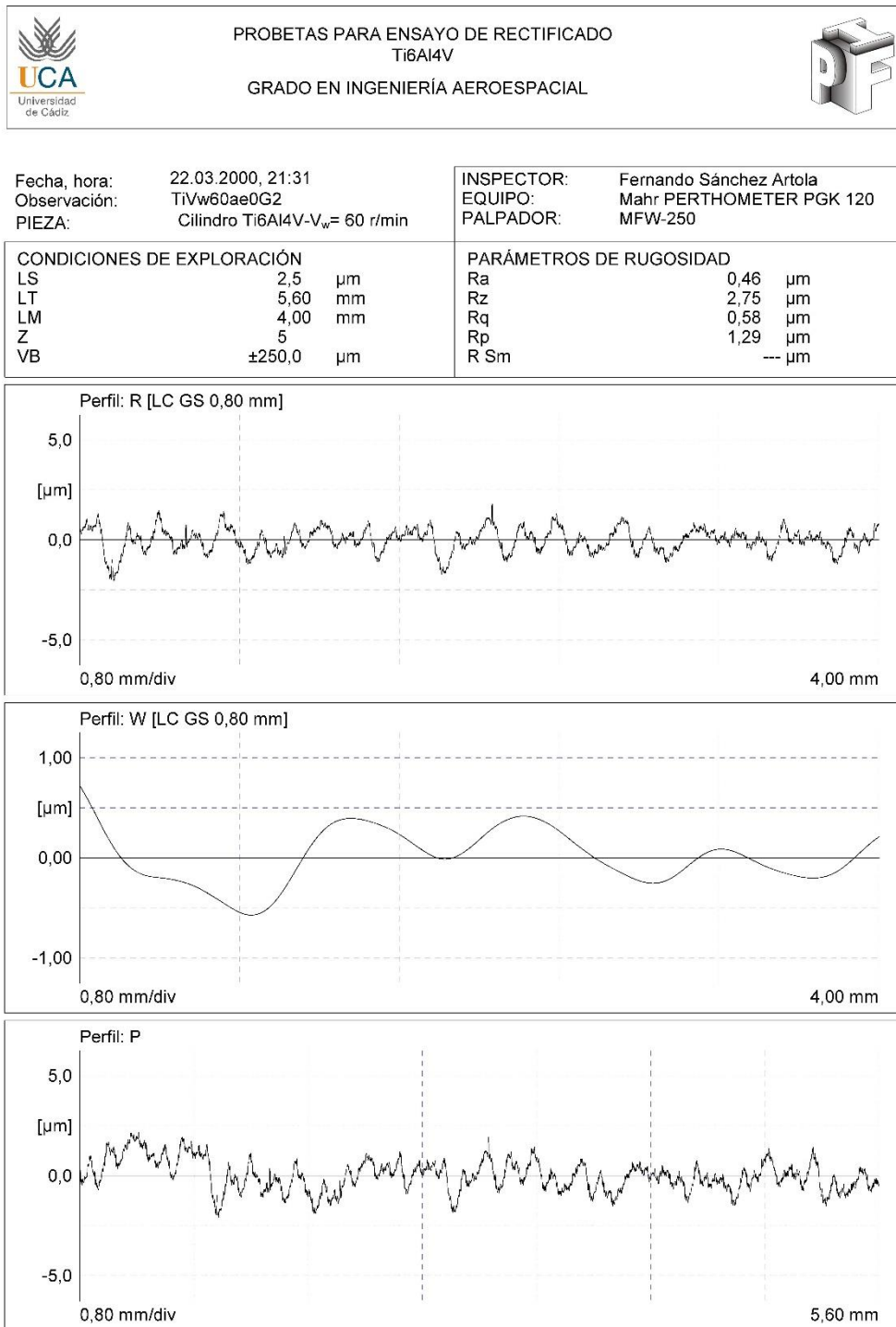
Perfil: W [LC GS 0,80 mm]



Perfil: P



ANEXOS



ANEXOS



PROBETAS PARA ENSAYO DE RECTIFICADO Ti6Al4V

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



Fecha, hora: 22.03.2000, 21:42
Observación: TiVw60ae0G3
PIEZA: Cilindro Ti6Al4V- $V_w = 60$ r/min

INSPECTOR: Fernando Sánchez Artola
EQUIPO: Mahr PERTHOMETER PGK 120
PALPADOR: MFW-250

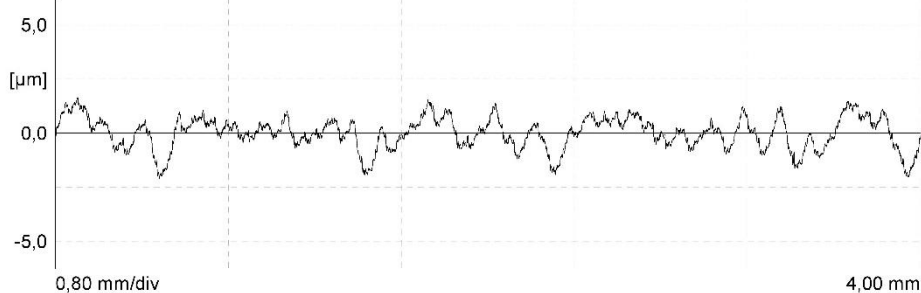
CONDICIONES DE EXPLORACIÓN

LS	2,5	μm
LT	5,60	mm
LM	4,00	mm
Z	5	
VB	$\pm 250,0$	μm

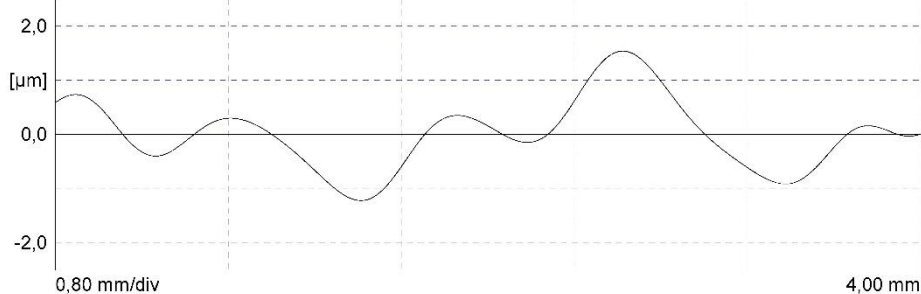
PARÁMETROS DE RUGOSIDAD

Ra	0,58	μm
Rz	3,16	μm
Rq	0,73	μm
Rp	1,38	μm
R Sm	248,00	μm

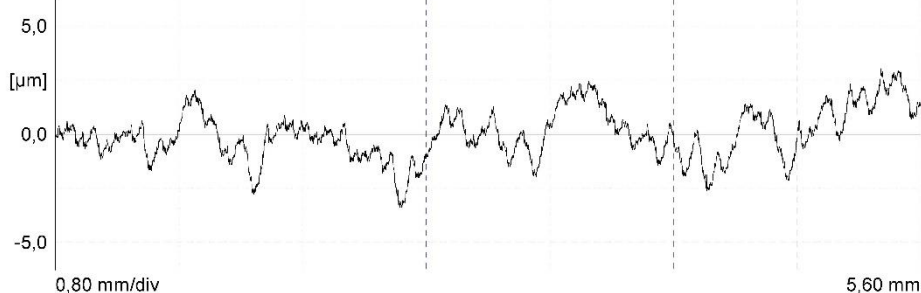
Perfil: R [LC GS 0,80 mm]



Perfil: W [LC GS 0,80 mm]



Perfil: P



ANEXOS



PROBETAS PARA ENSAYO DE RECTIFICADO Ti6Al4V

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



Fecha, hora: 22.03.2000, 21:54
Observación: TiVw60ae0G4
PIEZA: Cilindro Ti6Al4V- $V_w = 60$ r/min

INSPECTOR: Fernando Sánchez Artola
EQUIPO: Mahr PERTHOMETER PGK 120
PALPADOR: MFW-250

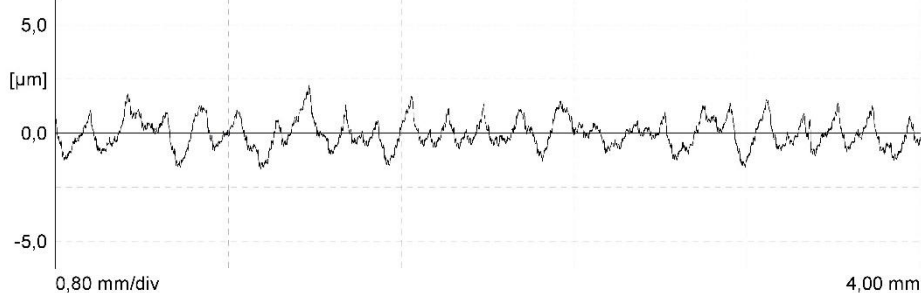
CONDICIONES DE EXPLORACIÓN

LS	2,5	μm
LT	5,60	mm
LM	4,00	mm
Z	5	
VB	$\pm 250,0$	μm

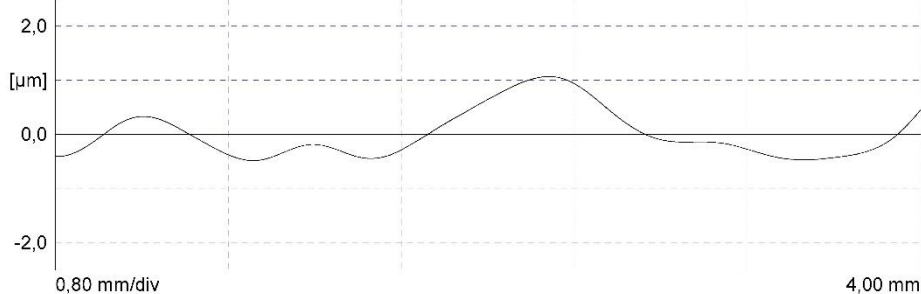
PARÁMETROS DE RUGOSIDAD

Ra	0,55	μm
Rz	3,20	μm
Rq	0,68	μm
Rp	1,73	μm
R Sm	181,19	μm

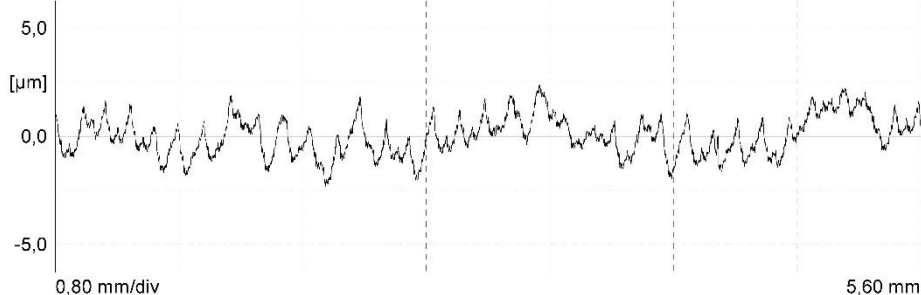
Perfil: R [LC GS 0,80 mm]



Perfil: W [LC GS 0,80 mm]



Perfil: P



ANEXOS



PROBETAS PARA ENSAYO DE RECTIFICADO Ti6Al4V

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



Fecha, hora: 22.03.2000, 21:01
Observación: TiVw60ae20G1
PIEZA: Cilindro Ti6Al4V- $V_w = 60$ r/min

INSPECTOR: Fernando Sánchez Artola
EQUIPO: Mahr PERTHOMETER PGK 120
PALPADOR: MFW-250

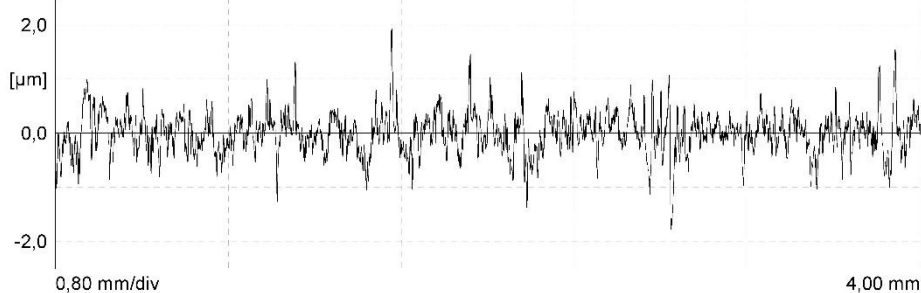
CONDICIONES DE EXPLORACIÓN

LS	2,5	μm
LT	5,60	mm
LM	4,00	mm
Z	5	
VB	$\pm 250,0$	μm

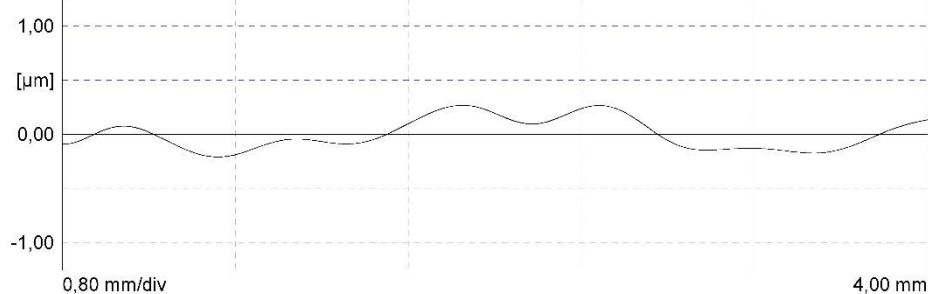
PARÁMETROS DE RUGOSIDAD

Ra	0,29	μm
Rz	2,69	μm
Rq	0,38	μm
Rp	1,40	μm
R Sm	---	μm

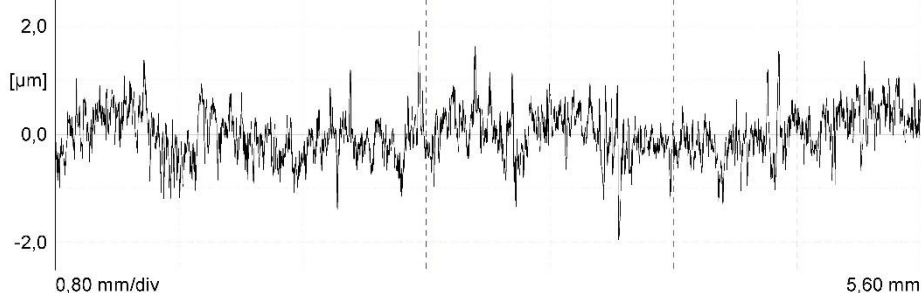
Perfil: R [LC GS 0,80 mm]



Perfil: W [LC GS 0,80 mm]



Perfil: P



ANEXOS



PROBETAS PARA ENSAYO DE RECTIFICADO Ti6Al4V

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



Fecha, hora: 22.03.2000, 21:20
Observación: TiVw60ae20G2
PIEZA: Cilindro Ti6Al4V- $V_w = 60$ r/min

INSPECTOR: Fernando Sánchez Artola
EQUIPO: Mahr PERTHOMETER PGK 120
PALPADOR: MFW-250

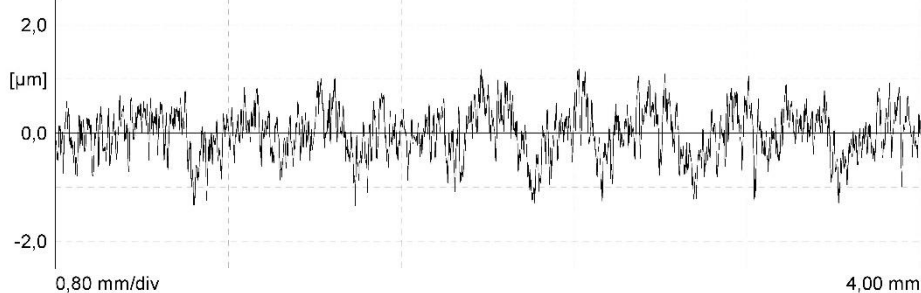
CONDICIONES DE EXPLORACIÓN

LS	2,5	μm
LT	5,60	mm
LM	4,00	mm
Z	5	
VB	$\pm 250,0$	μm

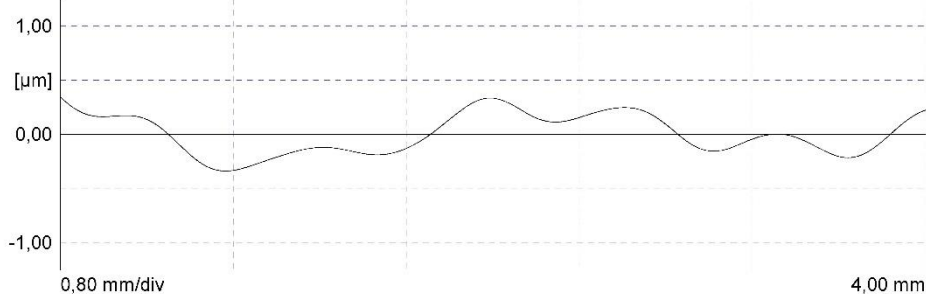
PARÁMETROS DE RUGOSIDAD

Ra	0,35	μm
Rz	2,36	μm
Rq	0,44	μm
Rp	1,05	μm
R Sm	---	μm

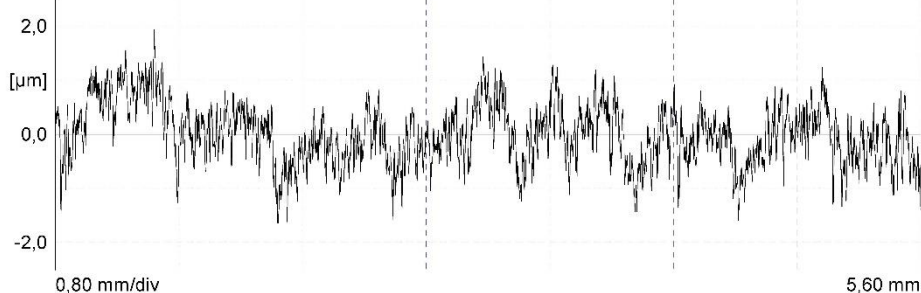
Perfil: R [LC GS 0,80 mm]



Perfil: W [LC GS 0,80 mm]



Perfil: P



ANEXOS



PROBETAS PARA ENSAYO DE RECTIFICADO
Ti6Al4V

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



Fecha, hora: 22.03.2000, 21:35
Observación: TiVw60ae20G3
PIEZA: Cilindro Ti6Al4V- $V_w = 60$ r/min

INSPECTOR: Fernando Sánchez Artola
EQUIPO: Mahr PERTHOMETER PGK 120
PALPADOR: MFW-250

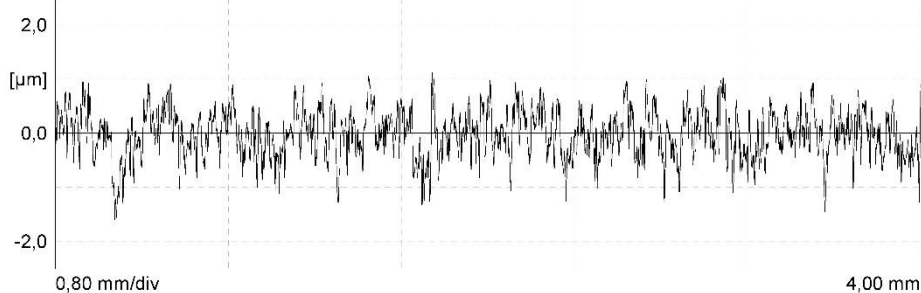
CONDICIONES DE EXPLORACIÓN

LS	2,5	μm
LT	5,60	mm
LM	4,00	mm
Z	5	
VB	$\pm 250,0$	μm

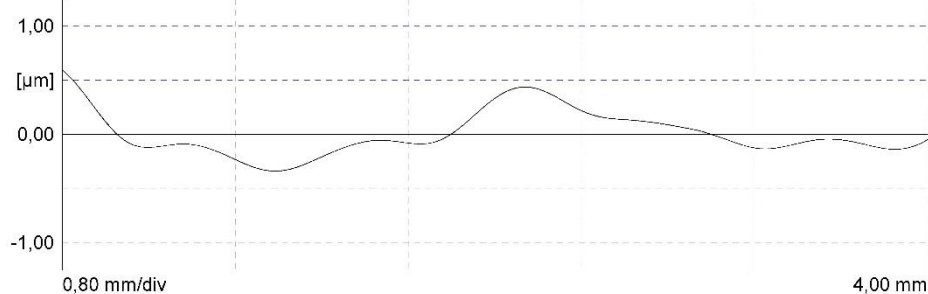
PARÁMETROS DE RUGOSIDAD

Ra	0,35	μm
Rz	2,40	μm
Rq	0,43	μm
Rp	1,02	μm
R Sm	---	μm

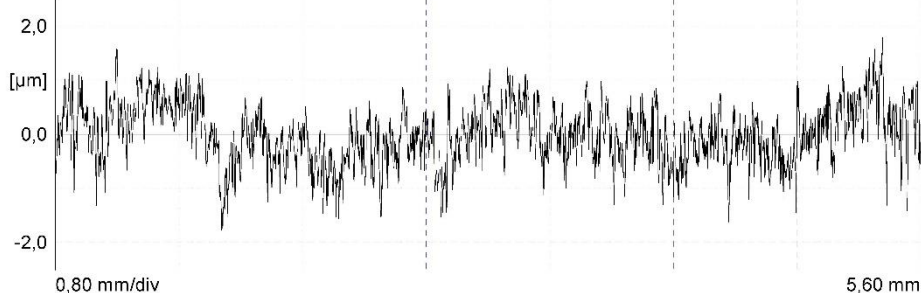
Perfil: R [LC GS 0,80 mm]



Perfil: W [LC GS 0,80 mm]



Perfil: P



ANEXOS



PROBETAS PARA ENSAYO DE RECTIFICADO Ti6Al4V

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



Fecha, hora: 22.03.2000, 21:45
Observación: TiVw60ae20G4
PIEZA: Cilindro Ti6Al4V- $V_w = 60$ r/min

INSPECTOR: Fernando Sánchez Artola
EQUIPO: Mahr PERTHOMETER PGK 120
PALPADOR: MFW-250

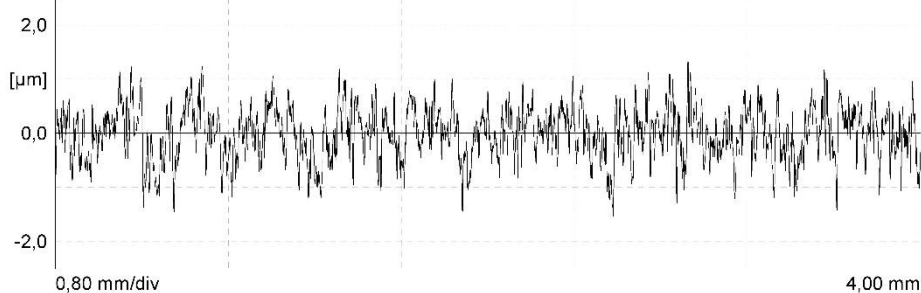
CONDICIONES DE EXPLORACIÓN

LS	2,5	μm
LT	5,60	mm
LM	4,00	mm
Z	5	
VB	$\pm 250,0$	μm

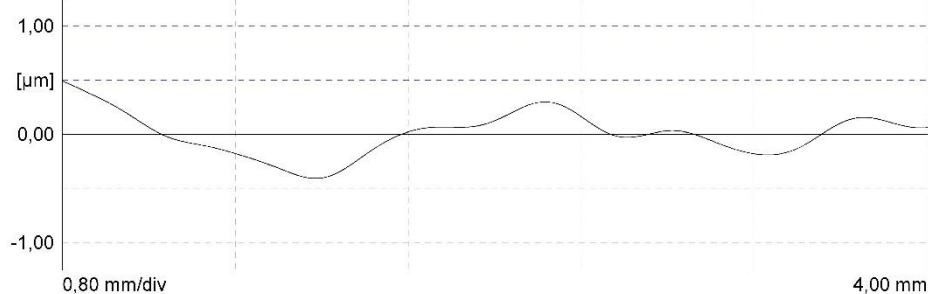
PARÁMETROS DE RUGOSIDAD

Ra	0,38	μm
Rz	2,61	μm
Rq	0,47	μm
Rp	1,19	μm
R Sm	---	μm

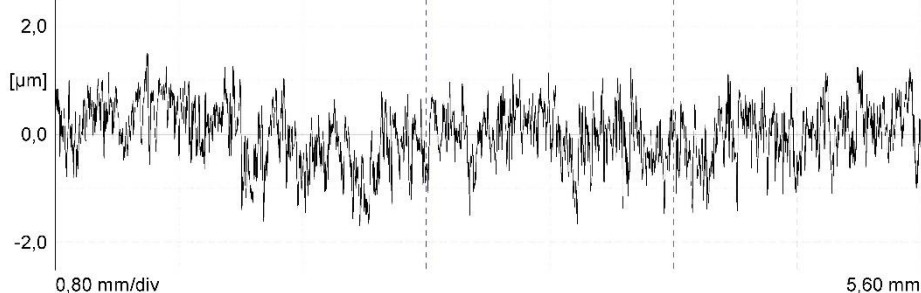
Perfil: R [LC GS 0,80 mm]



Perfil: W [LC GS 0,80 mm]



Perfil: P



ANEXOS



PROBETAS PARA ENSAYO DE RECTIFICADO Ti6Al4V GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



Fecha, hora: 22.03.2000, 21:06
Observación: TiVw60ae40G1
PIEZA: Cilindro Ti6Al4V- $V_w = 60$ r/min

INSPECTOR: Fernando Sánchez Artola
EQUIPO: Mahr PERTHOMETER PGK 120
PALPADOR: MFW-250

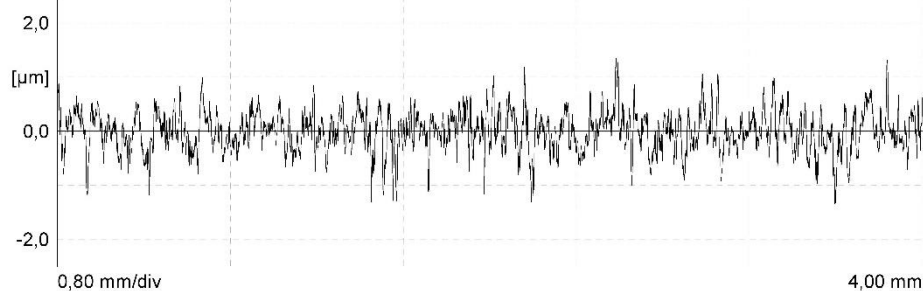
CONDICIONES DE EXPLORACIÓN

LS	2,5	μm
LT	5,60	mm
LM	4,00	mm
Z	5	
VB	$\pm 250,0$	μm

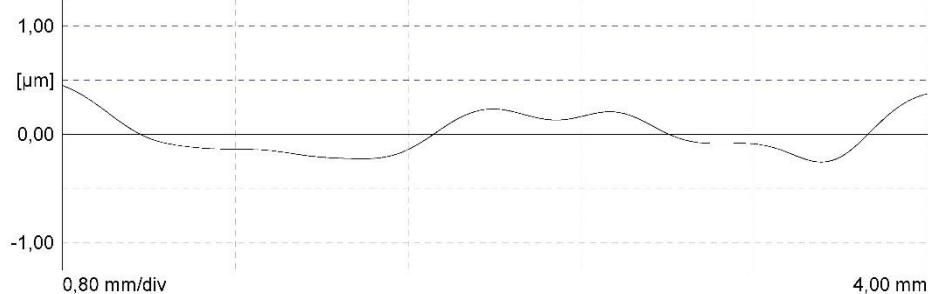
PARÁMETROS DE RUGOSIDAD

Ra	0,29	μm
Rz	2,37	μm
Rq	0,37	μm
Rp	1,14	μm
R Sm	---	μm

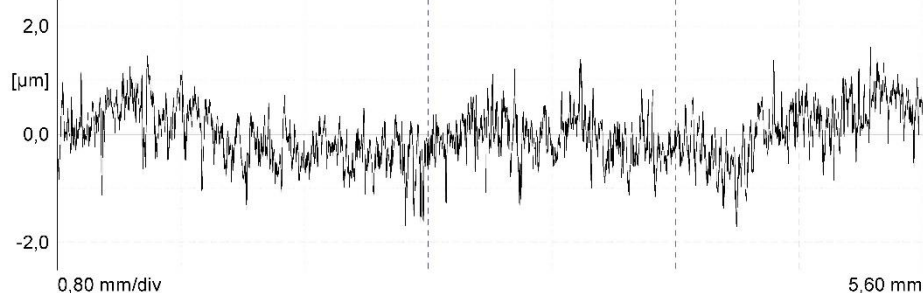
Perfil: R [LC GS 0,80 mm]



Perfil: W [LC GS 0,80 mm]



Perfil: P



ANEXOS



PROBETAS PARA ENSAYO DE RECTIFICADO Ti6Al4V

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



Fecha, hora: 22.03.2000, 21:24
Observación: TiVw60ae40G2
PIEZA: Cilindro Ti6Al4V- $V_w = 60$ r/min

INSPECTOR: Fernando Sánchez Artola
EQUIPO: Mahr PERTHOMETER PGK 120
PALPADOR: MFW-250

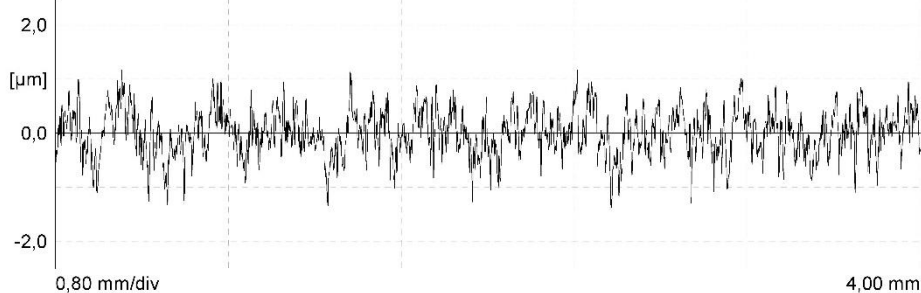
CONDICIONES DE EXPLORACIÓN

LS	2,5	μm
LT	5,60	mm
LM	4,00	mm
Z	5	
VB	$\pm 250,0$	μm

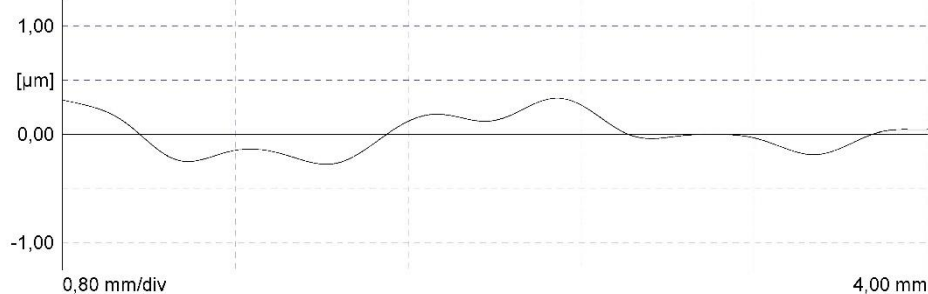
PARÁMETROS DE RUGOSIDAD

Ra	0,33	μm
Rz	2,35	μm
Rq	0,42	μm
Rp	1,06	μm
R Sm	---	μm

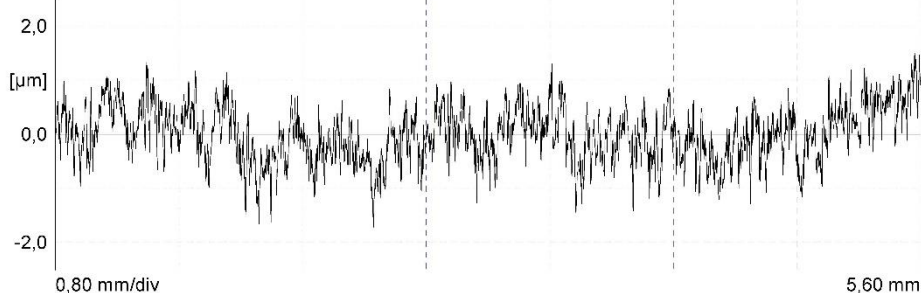
Perfil: R [LC GS 0,80 mm]



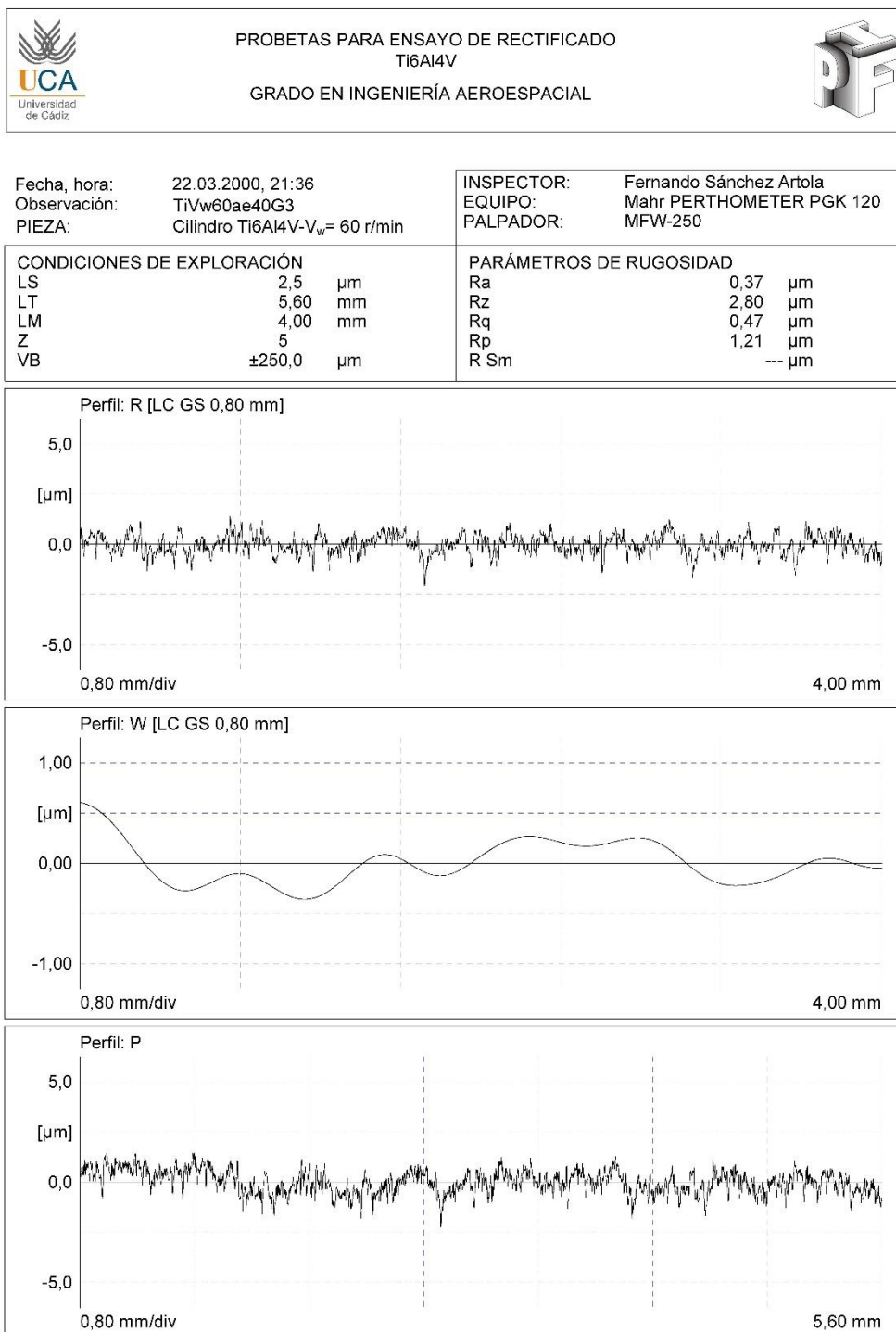
Perfil: W [LC GS 0,80 mm]



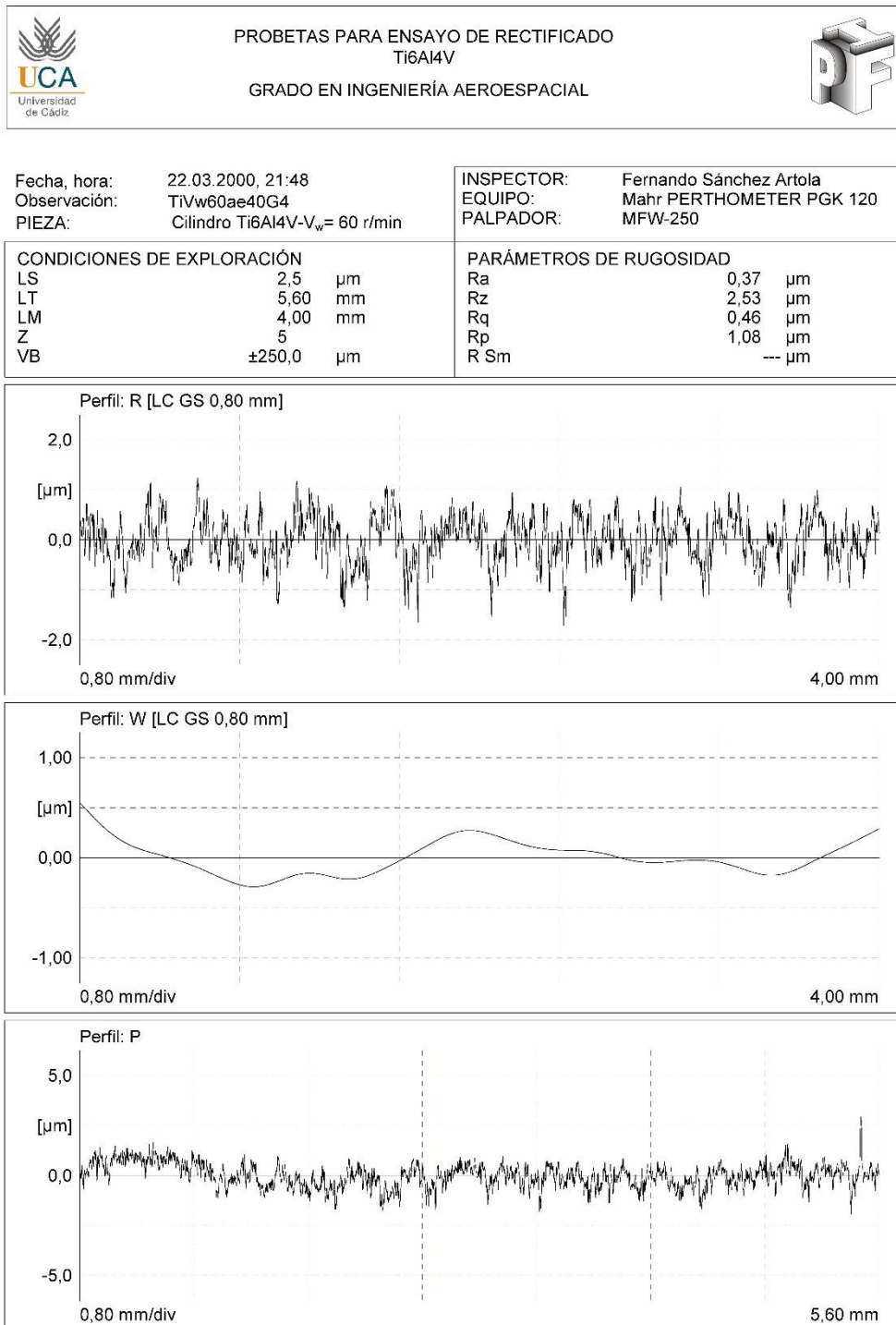
Perfil: P



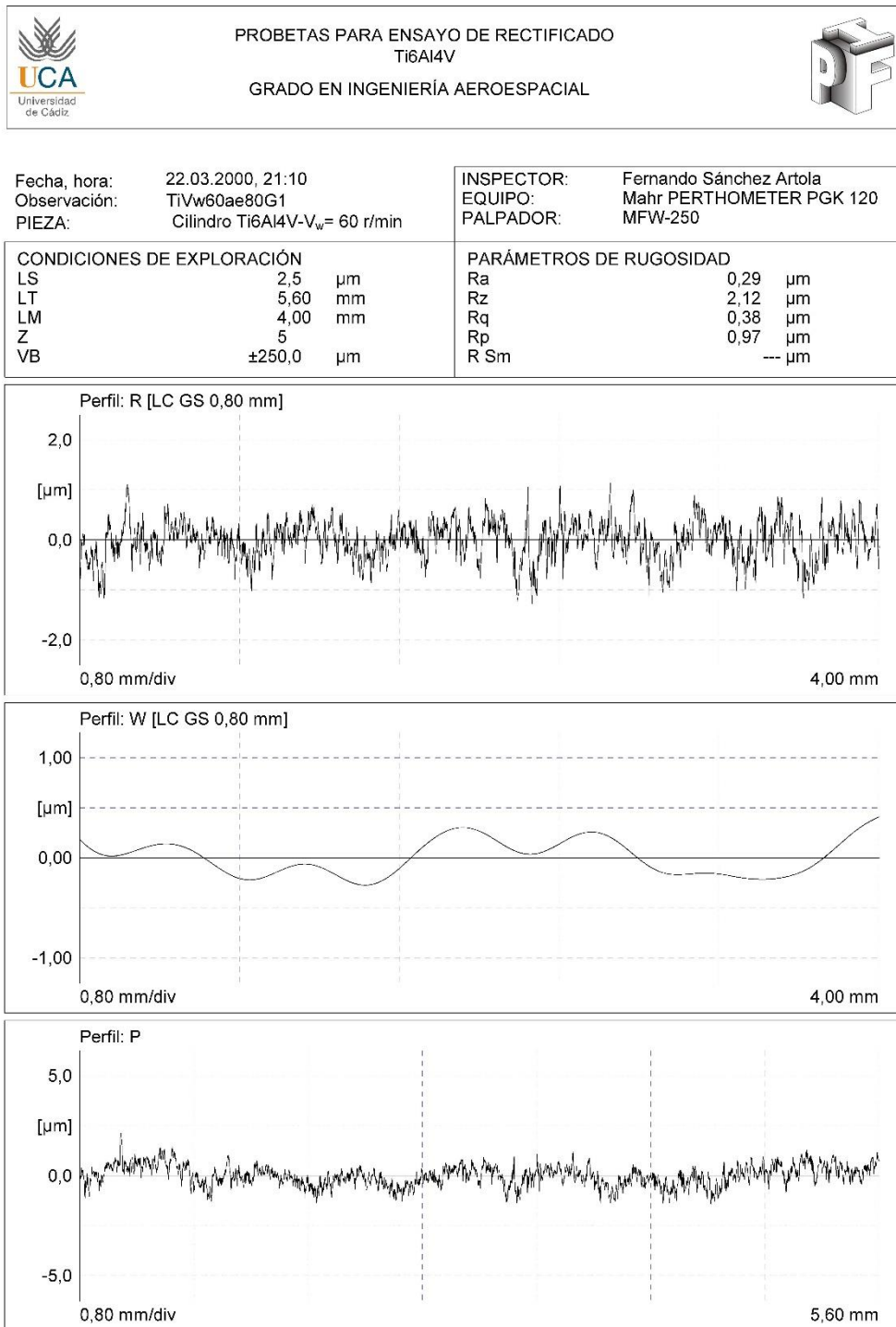
ANEXOS



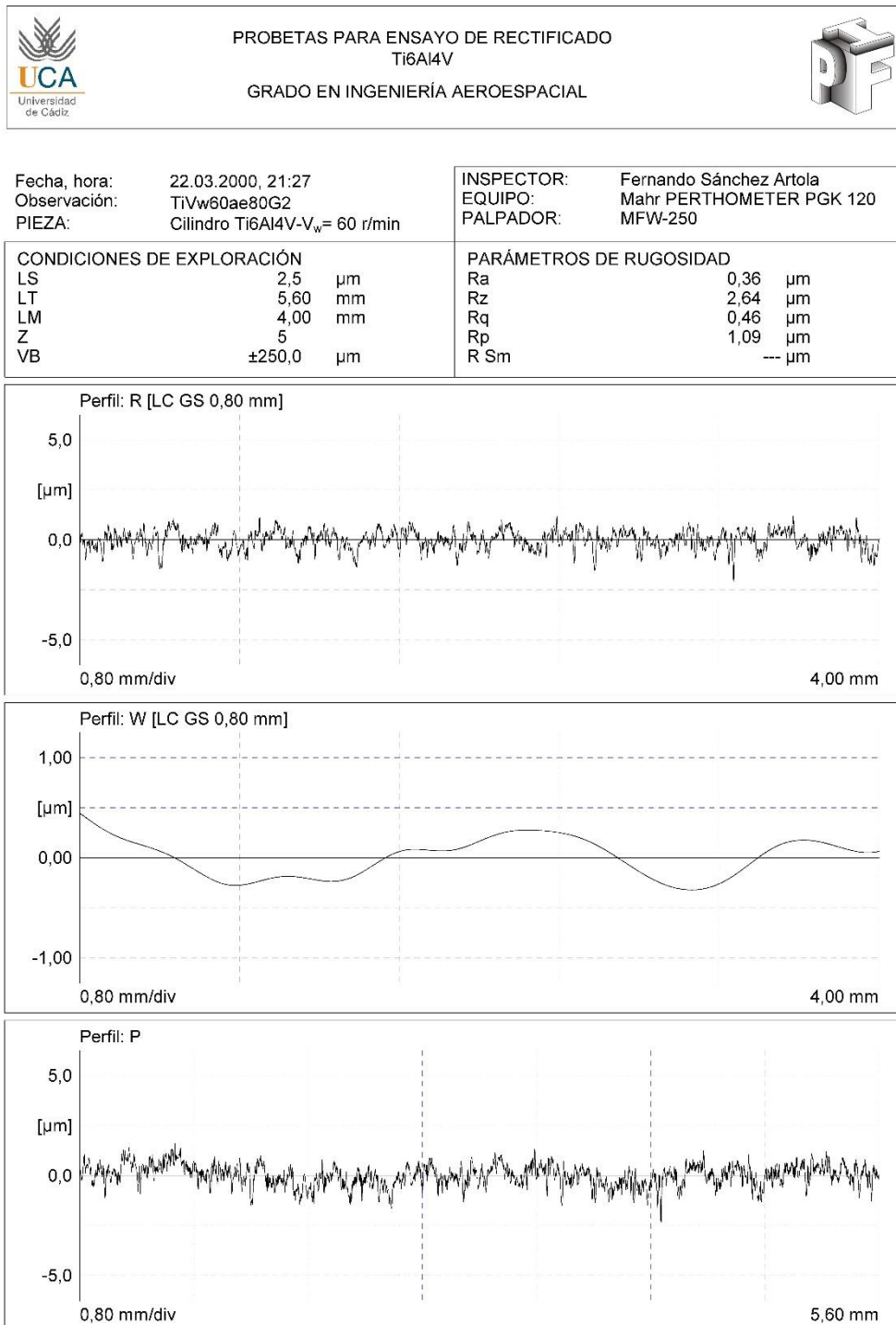
ANEXOS



ANEXOS



ANEXOS



ANEXOS



PROBETAS PARA ENSAYO DE RECTIFICADO Ti6Al4V

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



Fecha, hora: 22.03.2000, 21:38
Observación: TiVw60ae80G3
PIEZA: Cilindro Ti6Al4V- $V_w = 60$ r/min

INSPECTOR: Fernando Sánchez Artola
EQUIPO: Mahr PERTHOMETER PGK 120
PALPADOR: MFW-250

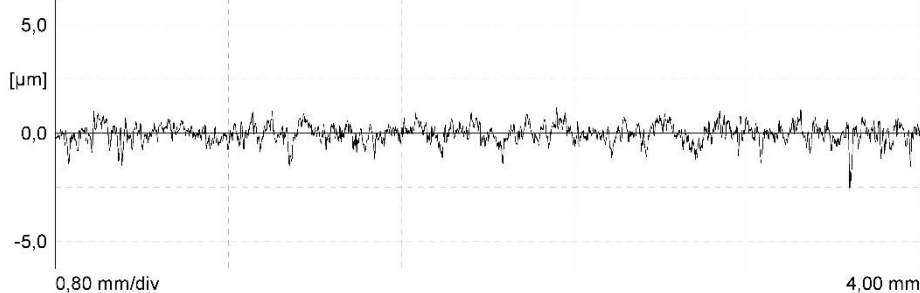
CONDICIONES DE EXPLORACIÓN

LS	2,5	μm
LT	5,60	mm
LM	4,00	mm
Z	5	
VB	$\pm 250,0$	μm

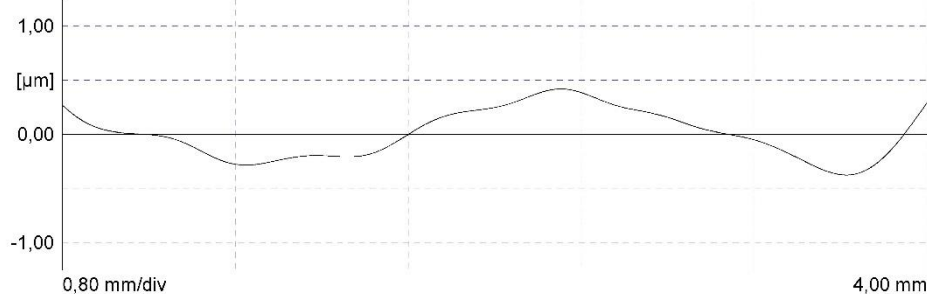
PARÁMETROS DE RUGOSIDAD

Ra	0,32	μm
Rz	2,70	μm
Rq	0,42	μm
Rp	1,06	μm
R Sm	---	μm

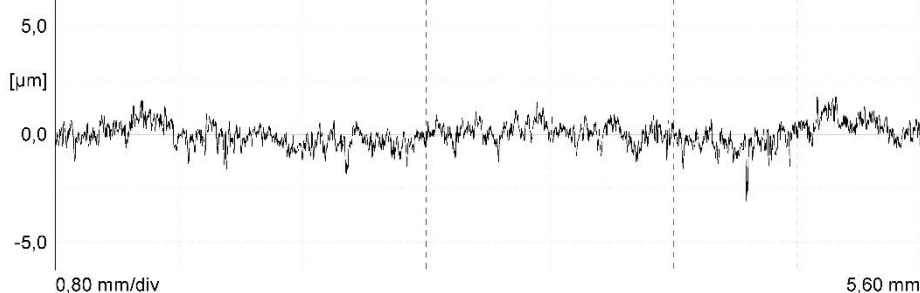
Perfil: R [LC GS 0,80 mm]



Perfil: W [LC GS 0,80 mm]



Perfil: P



ANEXOS



PROBETAS PARA ENSAYO DE RECTIFICADO Ti6Al4V

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



Fecha, hora: 22.03.2000, 21:49
Observación: TiVw60ae80G4
PIEZA: Cilindro Ti6Al4V- $V_w = 60$ r/min

INSPECTOR: Fernando Sánchez Artola
EQUIPO: Mahr PERTHOMETER PGK 120
PALPADOR: MFW-250

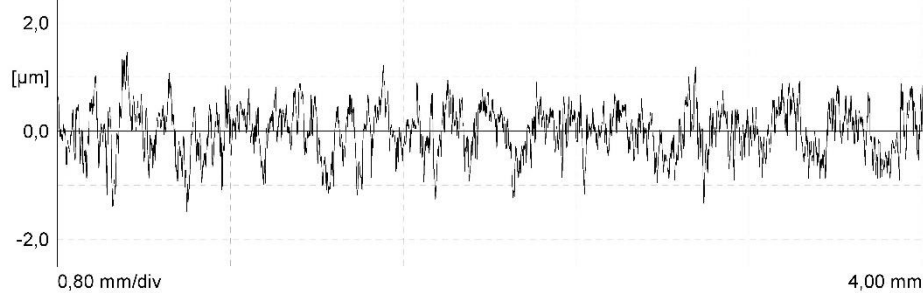
CONDICIONES DE EXPLORACIÓN

LS	2,5	μm
LT	5,60	mm
LM	4,00	mm
Z	5	
VB	$\pm 250,0$	μm

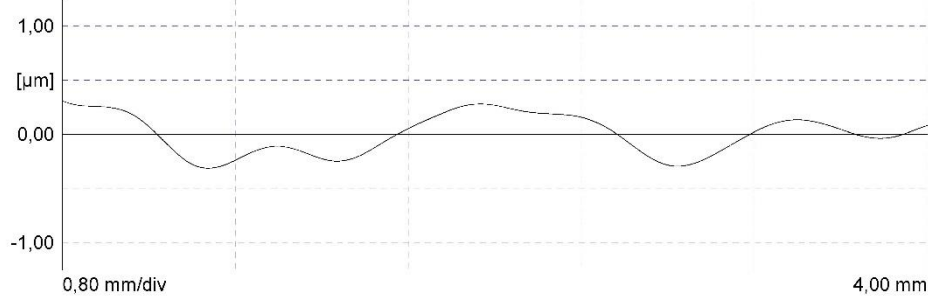
PARÁMETROS DE RUGOSIDAD

Ra	0,36	μm
Rz	2,38	μm
Rq	0,45	μm
Rp	1,15	μm
R Sm	---	μm

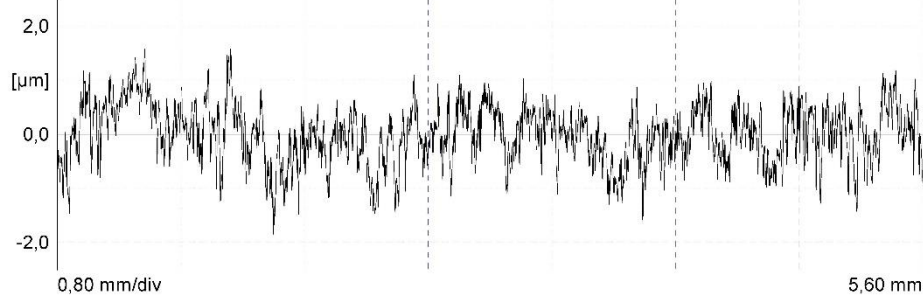
Perfil: R [LC GS 0,80 mm]



Perfil: W [LC GS 0,80 mm]



Perfil: P



ANEXOS



PROBETAS PARA ENSAYO DE RECTIFICADO Ti6Al4V

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



Fecha, hora: 22.03.2000, 20:18
Observación: TiVw170ae0G1
PIEZA: Cilindro Ti6Al4V- $V_w = 170$ r/min

INSPECTOR: Fernando Sánchez Artola
EQUIPO: Mahr PERTHOMETER PGK 120
PALPADOR: MFW-250

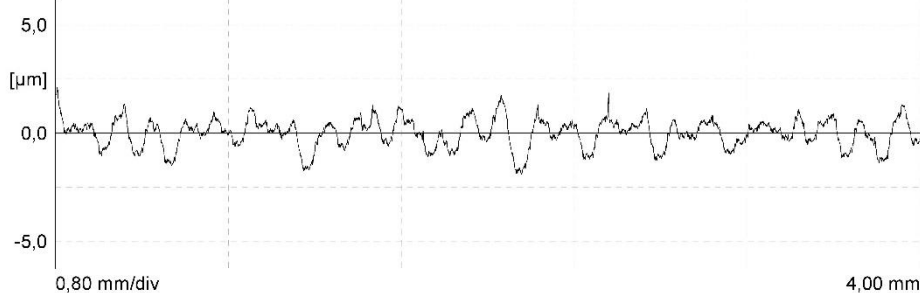
CONDICIONES DE EXPLORACIÓN

LS	2,5	μm
LT	5,60	mm
LM	4,00	mm
Z	5	
VB	$\pm 250,0$	μm

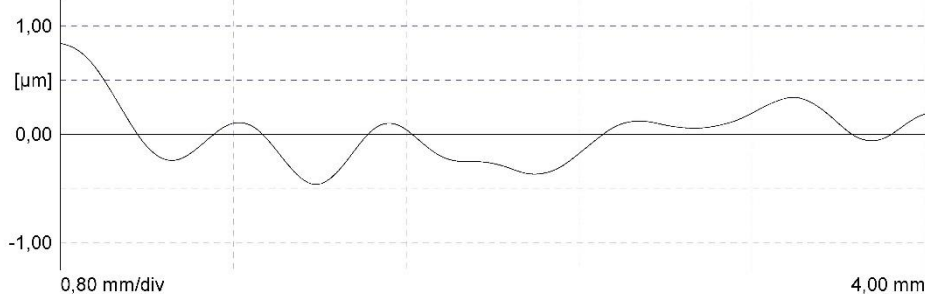
PARÁMETROS DE RUGOSIDAD

Ra	0,53	μm
Rz	3,21	μm
Rq	0,66	μm
Rp	1,67	μm
R Sm	180,32	μm

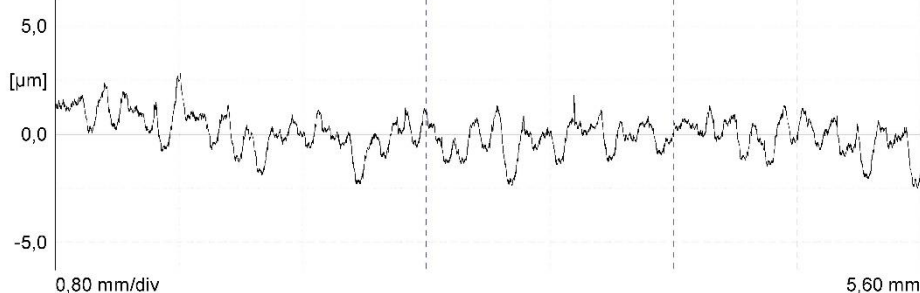
Perfil: R [LC GS 0,80 mm]



Perfil: W [LC GS 0,80 mm]



Perfil: P



ANEXOS



PROBETAS PARA ENSAYO DE RECTIFICADO
Ti6Al4V

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



Fecha, hora: 22.03.2000, 20:30
Observación: TiVw170ae0G2
PIEZA: Cilindro Ti6Al4V- $V_w = 170$ r/min

INSPECTOR: Fernando Sánchez Artola
EQUIPO: Mahr PERTHOMETER PGK 120
PALPADOR: MFW-250

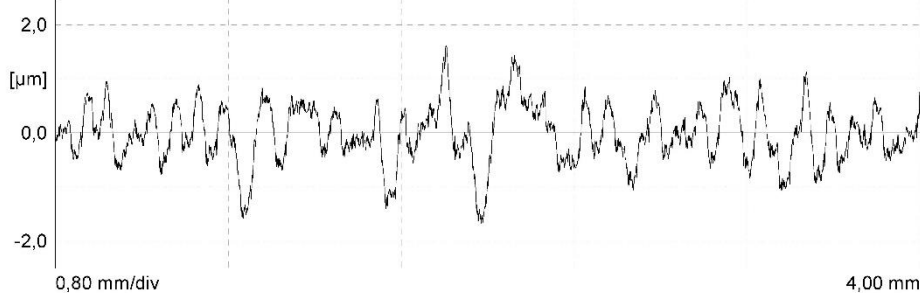
CONDICIONES DE EXPLORACIÓN

LS	2,5	μm
LT	5,60	mm
LM	4,00	mm
Z	5	
VB	$\pm 250,0$	μm

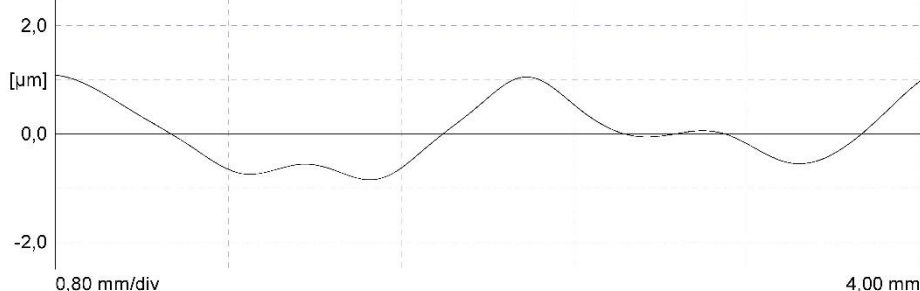
PARÁMETROS DE RUGOSIDAD

Ra	0,42	μm
Rz	2,34	μm
Rq	0,53	μm
Rp	1,11	μm
R Sm	---	μm

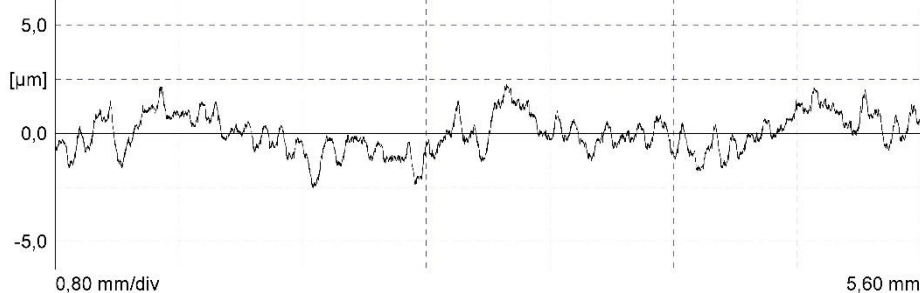
Perfil: R [LC GS 0,80 mm]



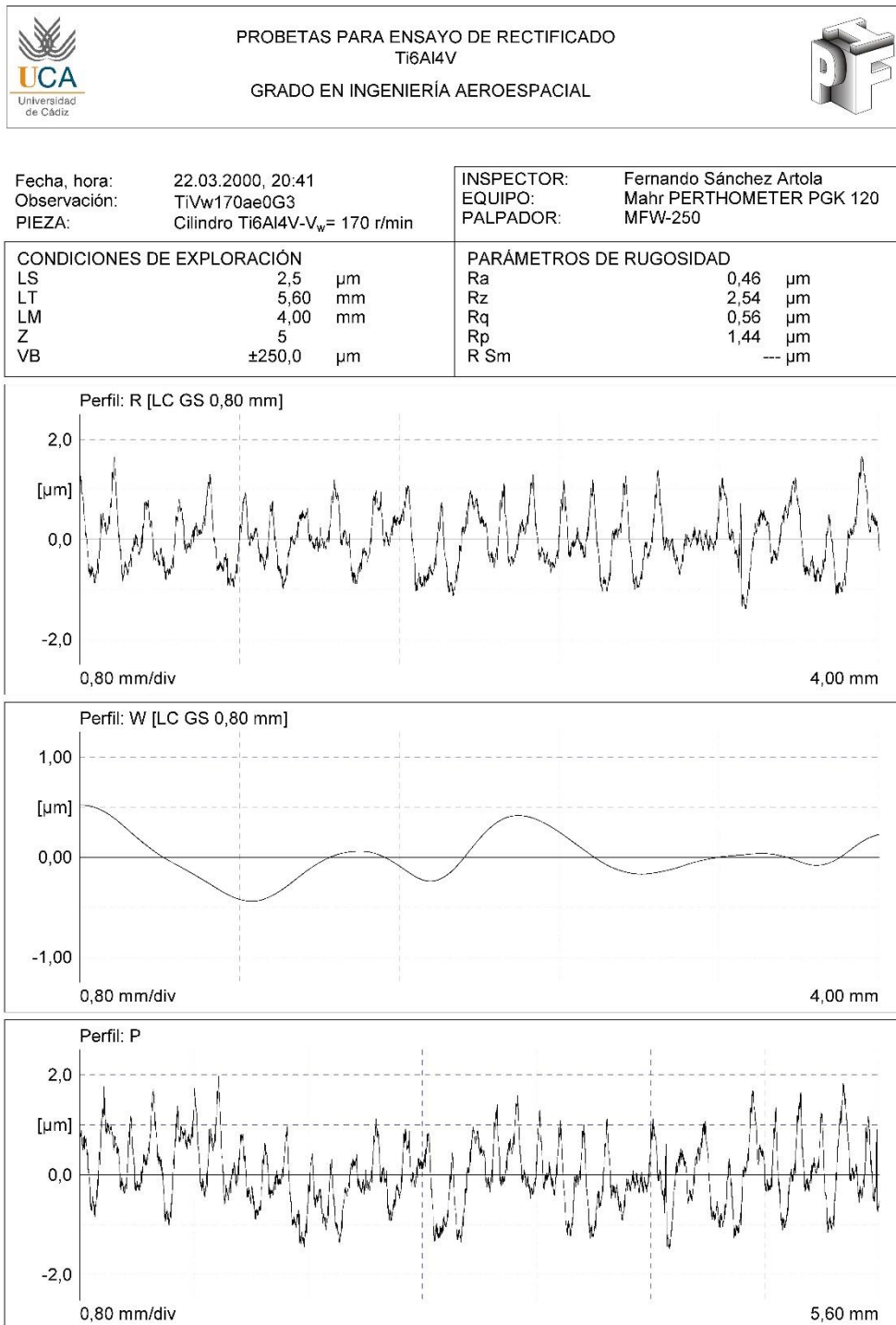
Perfil: W [LC GS 0,80 mm]



Perfil: P



ANEXOS



ANEXOS



PROBETAS PARA ENSAYO DE RECTIFICADO Ti6Al4V

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



Fecha, hora: 22.03.2000, 20:53
Observación: TiVw170ae0G4
PIEZA: Cilindro Ti6Al4V- $V_w = 170$ r/min

INSPECTOR: Fernando Sánchez Artola
EQUIPO: Mahr PERTHOMETER PGK 120
PALPADOR: MFW-250

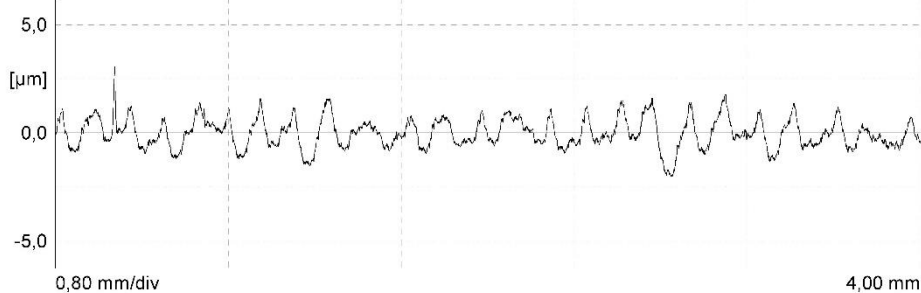
CONDICIONES DE EXPLORACIÓN

LS	2,5	μm
LT	5,60	mm
LM	4,00	mm
Z	5	
VB	$\pm 250,0$	μm

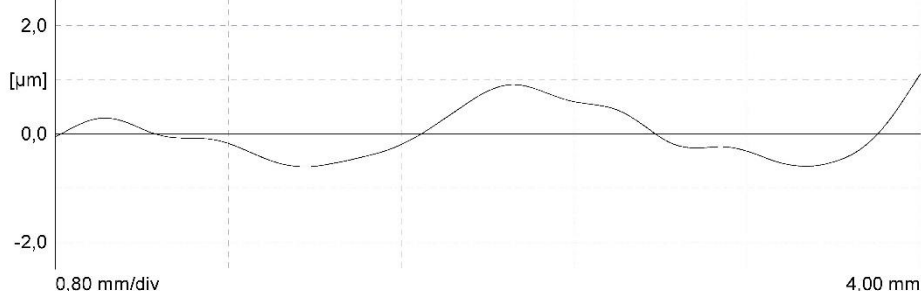
PARÁMETROS DE RUGOSIDAD

Ra	0,55	μm
Rz	3,18	μm
Rq	0,68	μm
Rp	1,79	μm
R Sm	170,85	μm

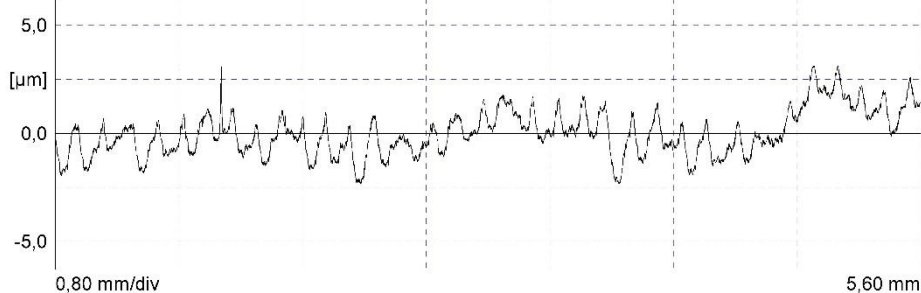
Perfil: R [LC GS 0,80 mm]



Perfil: W [LC GS 0,80 mm]



Perfil: P



ANEXOS



PROBETAS PARA ENSAYO DE RECTIFICADO
Ti6Al4V

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



Fecha, hora: 22.03.2000, 19:59
Observación: TiVw170ae20G1
PIEZA: Cilindro Ti6Al4V- $V_w = 170$ r/min

INSPECTOR: Fernando Sánchez Artola
EQUIPO: Mahr PERTHOMETER PGK 120
PALPADOR: MFV-250

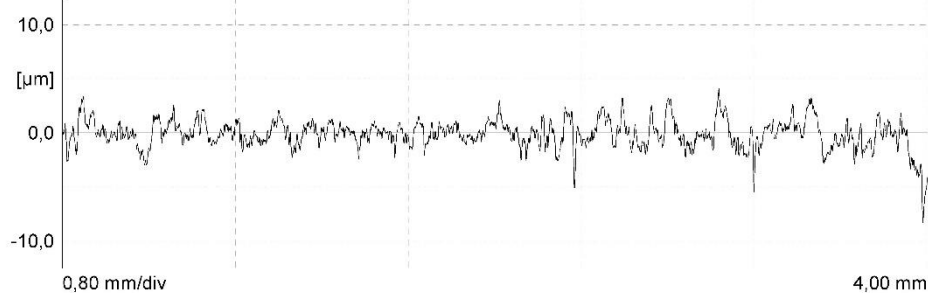
CONDICIONES DE EXPLORACIÓN

LS	2,5	μm
LT	5,60	mm
LM	4,00	mm
Z	5	
VB	$\pm 250,0$	μm

PARÁMETROS DE RUGOSIDAD

Ra	0,95	μm
Rz	8,01	μm
Rq	1,31	μm
Rp	3,17	μm
R Sm	90,98	μm

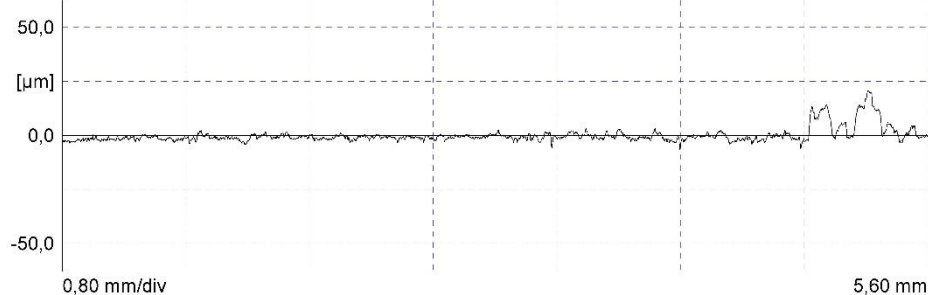
Perfil: R [LC GS 0,80 mm]



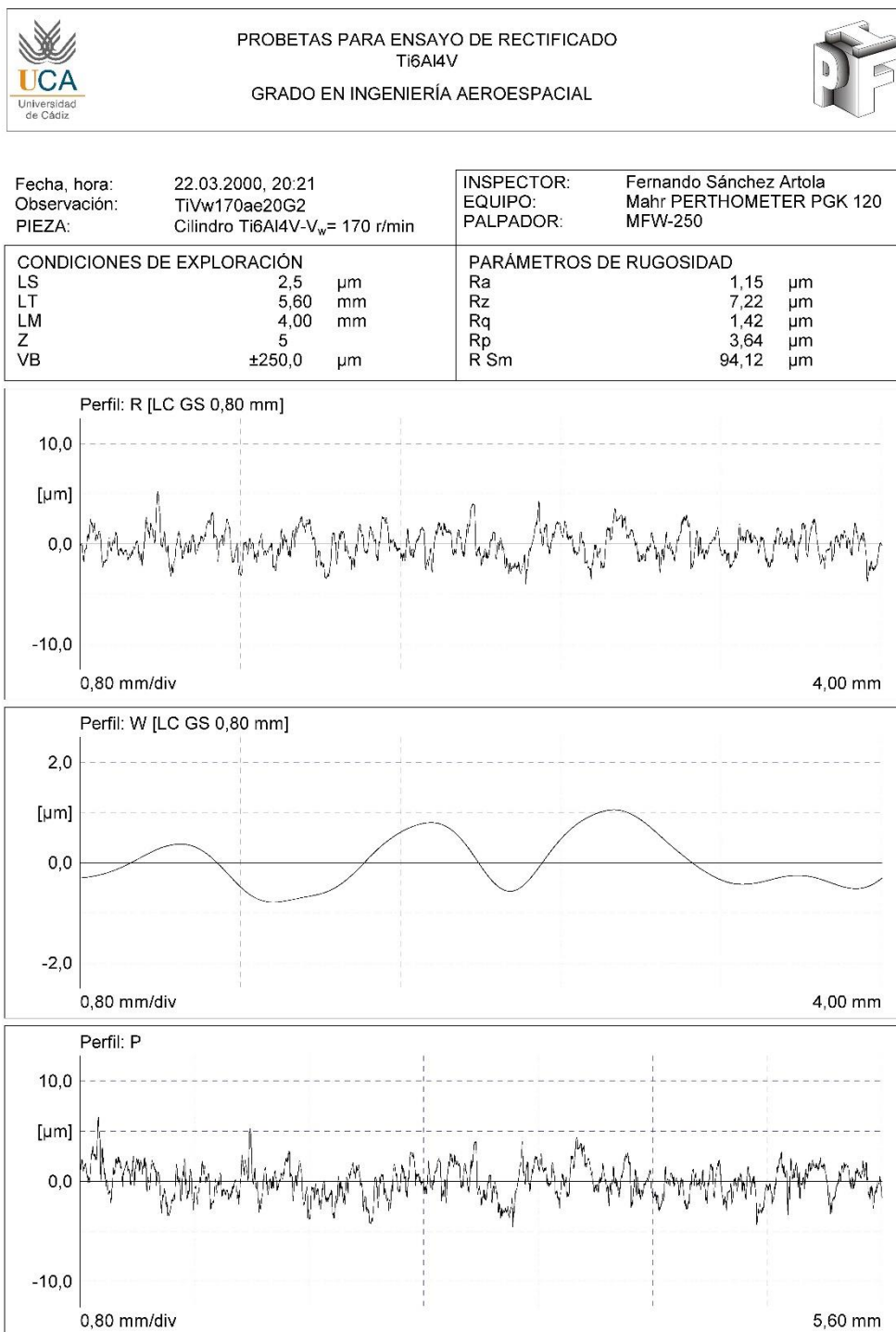
Perfil: W [LC GS 0,80 mm]



Perfil: P



ANEXOS



ANEXOS



PROBETAS PARA ENSAYO DE RECTIFICADO Ti6Al4V

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



Fecha, hora: 22.03.2000, 20:33
Observación: TiVw170ae20G3
PIEZA: Cilindro Ti6Al4V- $V_w = 170$ r/min

INSPECTOR: Fernando Sánchez Artola
EQUIPO: Mahr PERTHOMETER PGK 120
PALPADOR: MFW-250

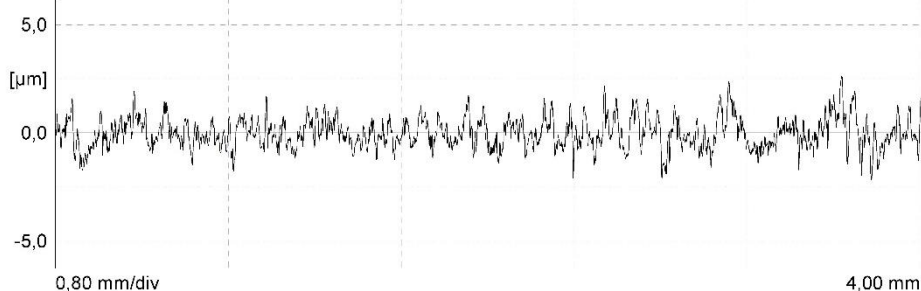
CONDICIONES DE EXPLORACIÓN

LS	2,5	μm
LT	5,60	mm
LM	4,00	mm
Z	5	
VB	$\pm 250,0$	μm

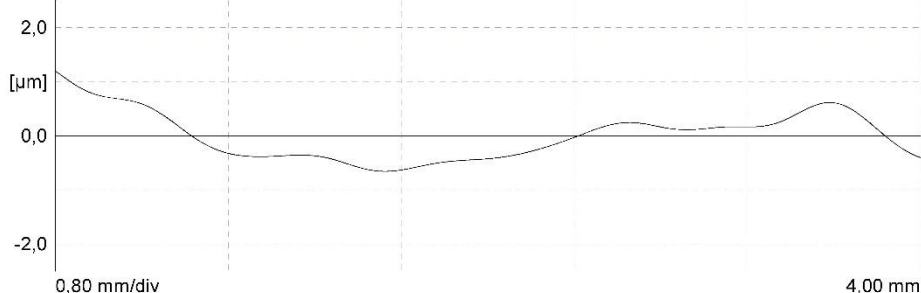
PARÁMETROS DE RUGOSIDAD

Ra	0,55	μm
Rz	4,05	μm
Rq	0,70	μm
Rp	2,07	μm
R Sm	60,78	μm

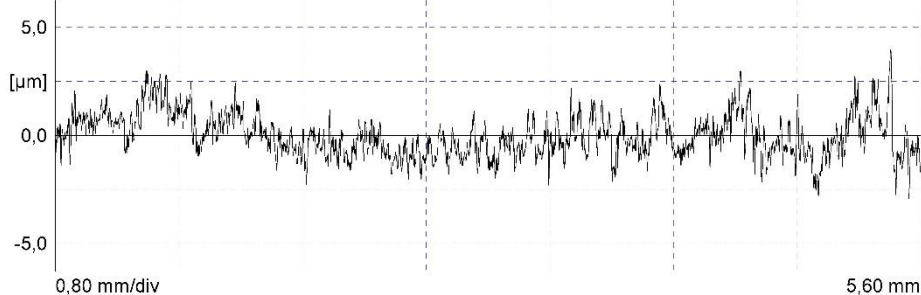
Perfil: R [LC GS 0,80 mm]



Perfil: W [LC GS 0,80 mm]



Perfil: P



ANEXOS



PROBETAS PARA ENSAYO DE RECTIFICADO Ti6Al4V

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



Fecha, hora: 22.03.2000, 20:46
Observación: TiVw170ae20G4
PIEZA: Cilindro Ti6Al4V- $V_w = 170$ r/min

INSPECTOR: Fernando Sánchez Artola
EQUIPO: Mahr PERTHOMETER PGK 120
PALPADOR: MFW-250

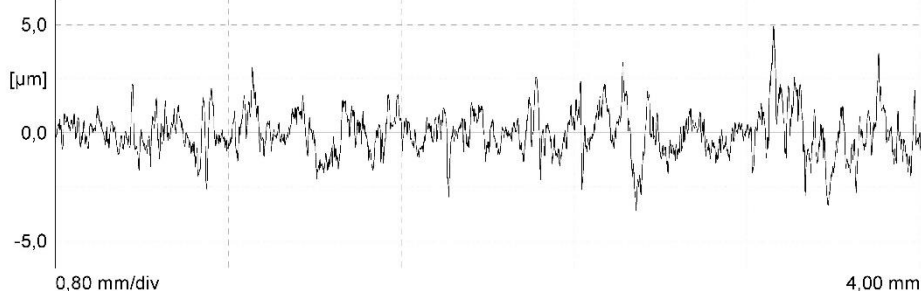
CONDICIONES DE EXPLORACIÓN

LS	2,5	μm
LT	5,60	mm
LM	4,00	mm
Z	5	
VB	$\pm 250,0$	μm

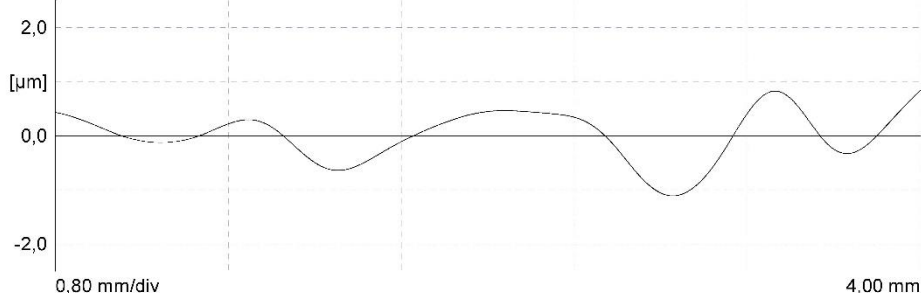
PARÁMETROS DE RUGOSIDAD

Ra	0,77	μm
Rz	6,14	μm
Rq	1,01	μm
Rp	3,22	μm
R Sm	76,98	μm

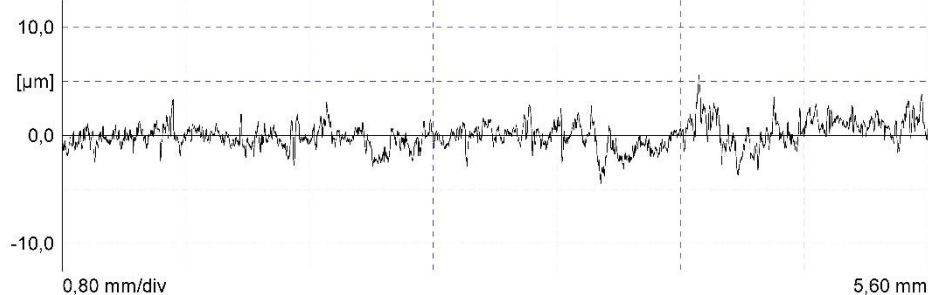
Perfil: R [LC GS 0,80 mm]



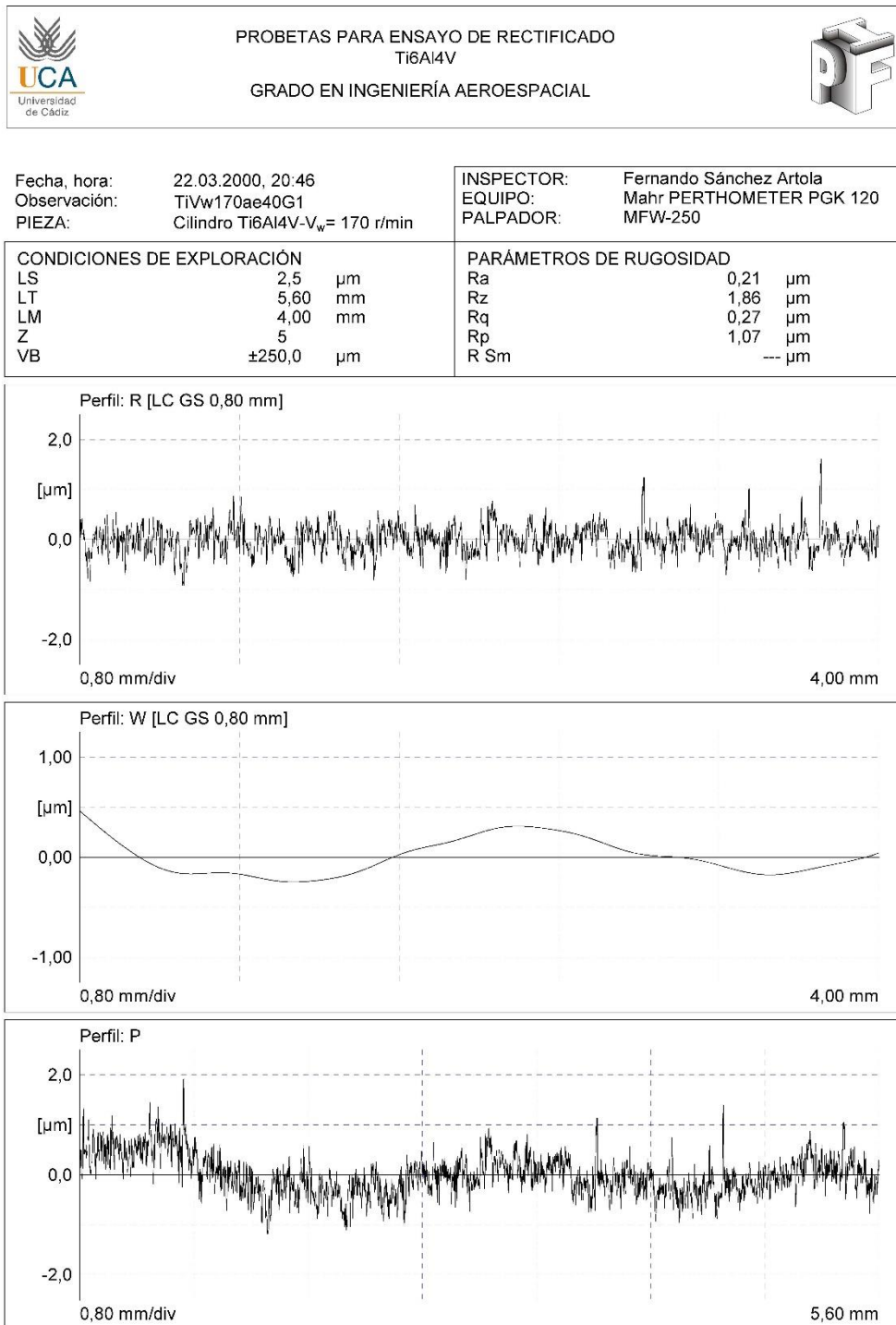
Perfil: W [LC GS 0,80 mm]



Perfil: P



ANEXOS



ANEXOS



PROBETAS PARA ENSAYO DE RECTIFICADO
Ti6Al4V

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



Fecha, hora: 22.03.2000, 20:23
Observación: TiVw170ae40G2
PIEZA: Cilindro Ti6Al4V- $V_w = 170$ r/min

INSPECTOR: Fernando Sánchez Artola
EQUIPO: Mahr PERTHOMETER PGK 120
PALPADOR: MFW-250

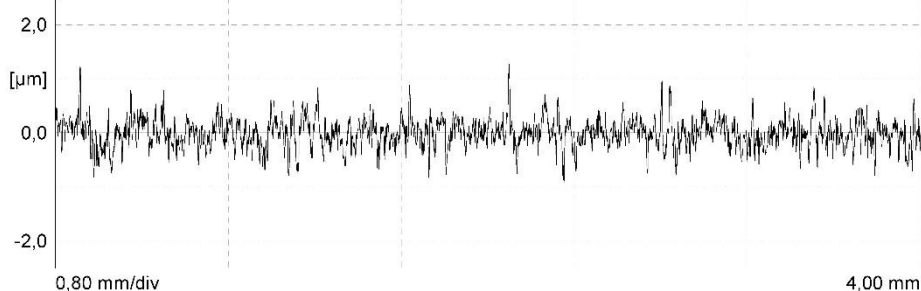
CONDICIONES DE EXPLORACIÓN

LS	2,5	μm
LT	5,60	mm
LM	4,00	mm
Z	5	
VB	$\pm 250,0$	μm

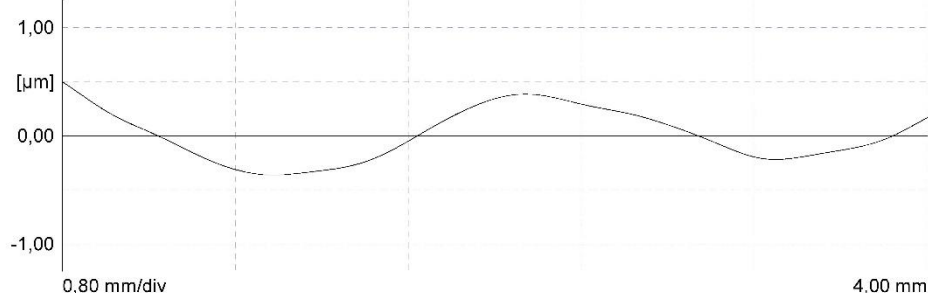
PARÁMETROS DE RUGOSIDAD

Ra	0,20	μm
Rz	1,85	μm
Rq	0,27	μm
Rp	1,04	μm
R Sm	---	μm

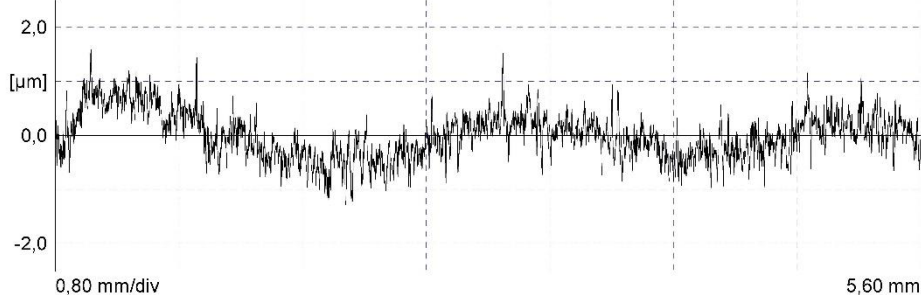
Perfil: R [LC GS 0,80 mm]



Perfil: W [LC GS 0,80 mm]



Perfil: P



ANEXOS



PROBETAS PARA ENSAYO DE RECTIFICADO Ti6Al4V

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



Fecha, hora: 22.03.2000, 20:35
Observación: TiVw170ae40G3
PIEZA: Cilindro Ti6Al4V- $V_w = 170$ r/min

INSPECTOR: Fernando Sánchez Artola
EQUIPO: Mahr PERTHOMETER PGK 120
PALPADOR: MFW-250

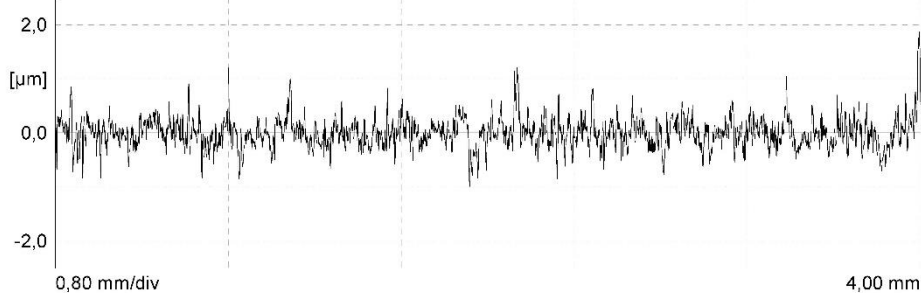
CONDICIONES DE EXPLORACIÓN

LS	2,5	μm
LT	5,60	mm
LM	4,00	mm
Z	5	
VB	$\pm 250,0$	μm

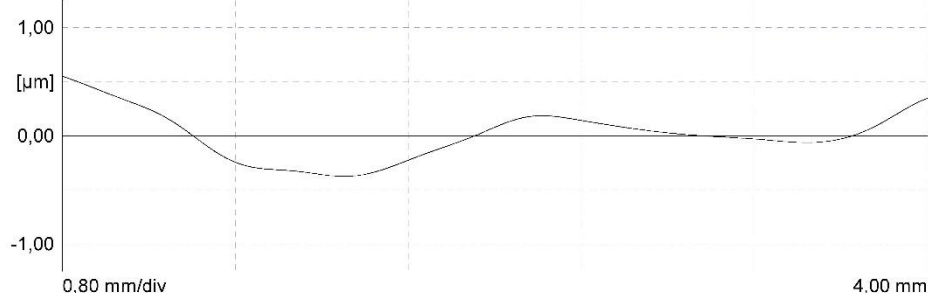
PARÁMETROS DE RUGOSIDAD

Ra	0,20	μm
Rz	2,04	μm
Rq	0,28	μm
Rp	1,20	μm
R Sm	---	μm

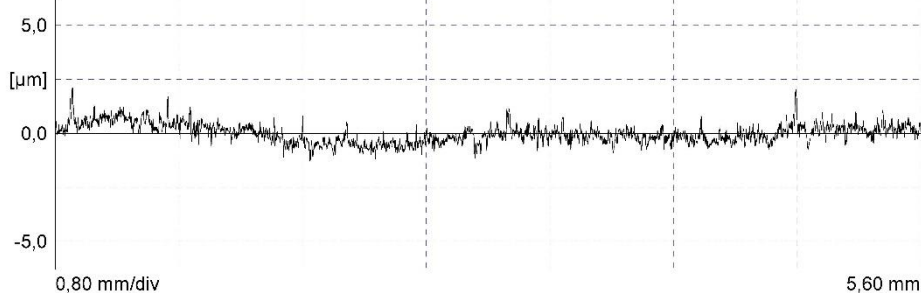
Perfil: R [LC GS 0,80 mm]



Perfil: W [LC GS 0,80 mm]



Perfil: P



ANEXOS



PROBETAS PARA ENSAYO DE RECTIFICADO Ti6Al4V

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



Fecha, hora: 22.03.2000, 20:48
Observación: TiVw170ae40G4
PIEZA: Cilindro Ti6Al4V- $V_w = 170$ r/min

INSPECTOR: Fernando Sánchez Artola
EQUIPO: Mahr PERTHOMETER PGK 120
PALPADOR: MFW-250

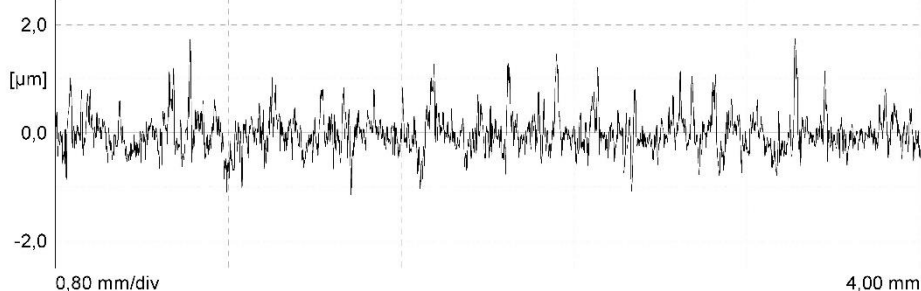
CONDICIONES DE EXPLORACIÓN

LS	2,5	μm
LT	5,60	mm
LM	4,00	mm
Z	5	
VB	$\pm 250,0$	μm

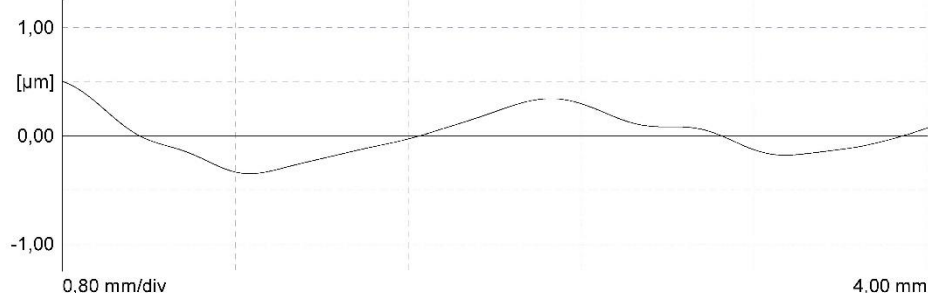
PARÁMETROS DE RUGOSIDAD

Ra	0,26	μm
Rz	2,45	μm
Rq	0,35	μm
Rp	1,43	μm
R Sm	---	μm

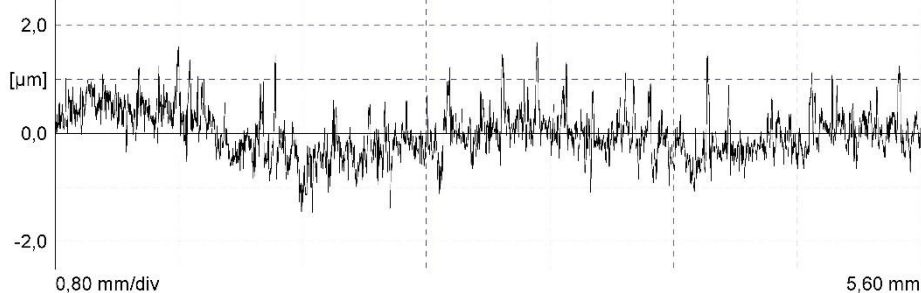
Perfil: R [LC GS 0,80 mm]



Perfil: W [LC GS 0,80 mm]



Perfil: P



ANEXOS



PROBETAS PARA ENSAYO DE RECTIFICADO
Ti6Al4V

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



Fecha, hora: 22.03.2000, 20:08
Observación: TiVw170ae80G1
PIEZA: Cilindro Ti6Al4V- $V_w = 170$ r/min

INSPECTOR: Fernando Sánchez Artola
EQUIPO: Mahr PERTHOMETER PGK 120
PALPADOR: MFW-250

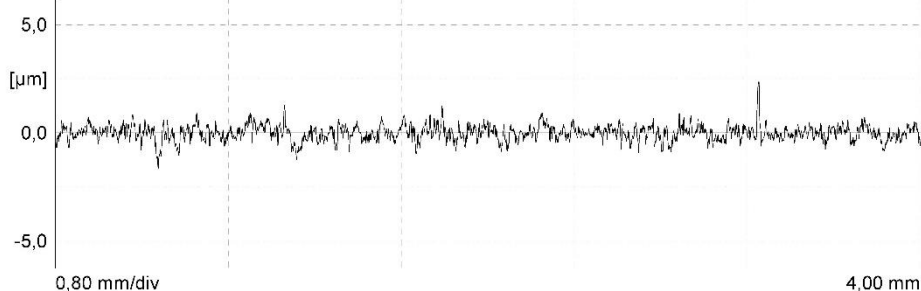
CONDICIONES DE EXPLORACIÓN

LS	2,5	μm
LT	5,60	mm
LM	4,00	mm
Z	5	
VB	$\pm 250,0$	μm

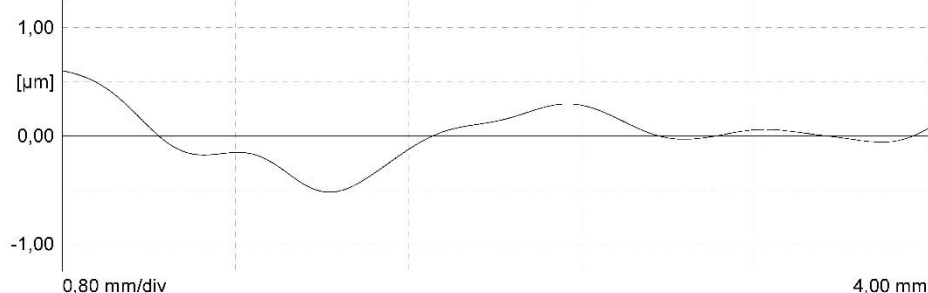
PARÁMETROS DE RUGOSIDAD

Ra	0,27	μm
Rz	2,46	μm
Rq	0,36	μm
Rp	1,34	μm
R Sm	---	μm

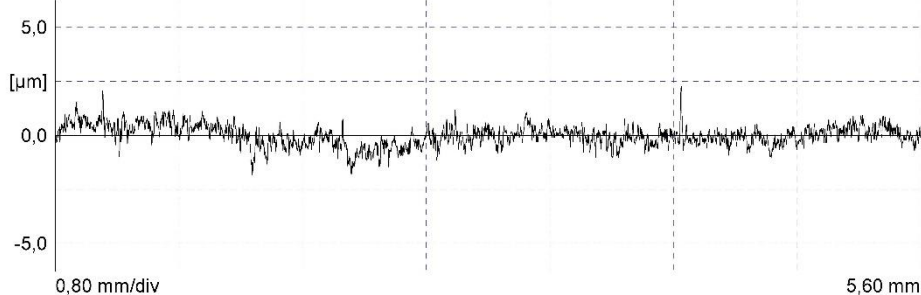
Perfil: R [LC GS 0,80 mm]



Perfil: W [LC GS 0,80 mm]



Perfil: P



ANEXOS



PROBETAS PARA ENSAYO DE RECTIFICADO Ti6Al4V

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



Fecha, hora: 22.03.2000, 20:25
Observación: TiVw170ae80G2
PIEZA: Cilindro Ti6Al4V- $V_w = 170$ r/min

INSPECTOR: Fernando Sánchez Artola
EQUIPO: Mahr PERTHOMETER PGK 120
PALPADOR: MFW-250

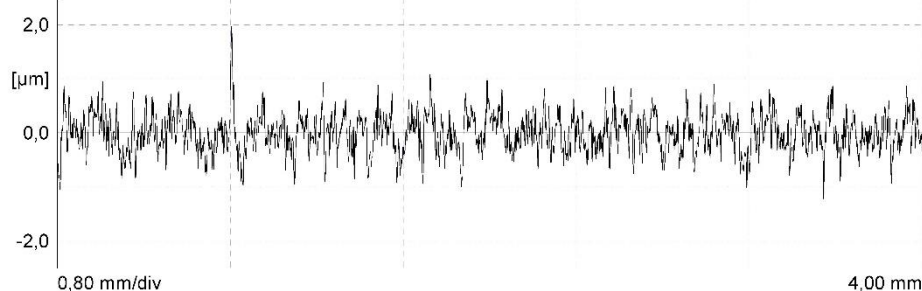
CONDICIONES DE EXPLORACIÓN

LS	2,5	μm
LT	5,60	mm
LM	4,00	mm
Z	5	
VB	$\pm 250,0$	μm

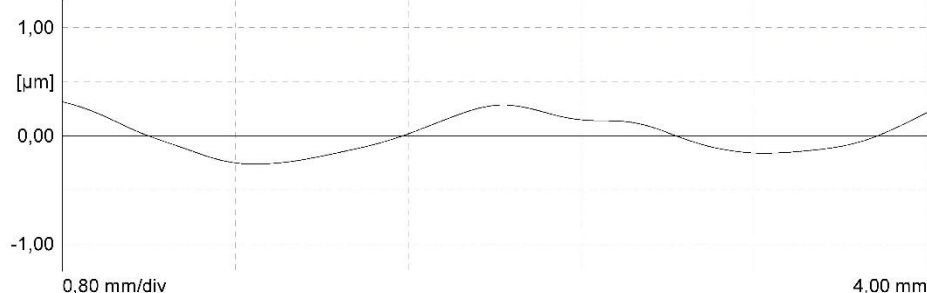
PARÁMETROS DE RUGOSIDAD

Ra	0,27	μm
Rz	2,20	μm
Rq	0,35	μm
Rp	1,15	μm
R Sm	---	μm

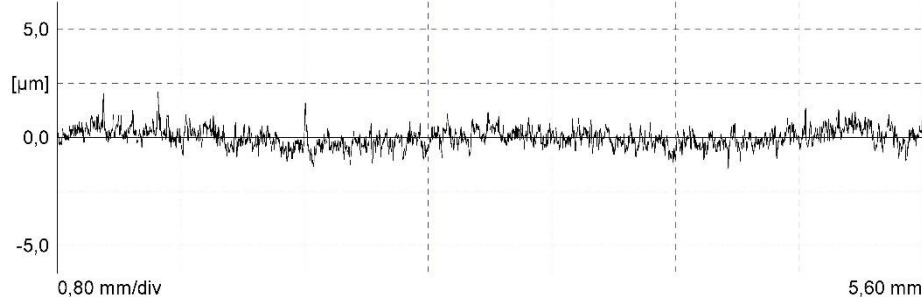
Perfil: R [LC GS 0,80 mm]



Perfil: W [LC GS 0,80 mm]



Perfil: P



ANEXOS



PROBETAS PARA ENSAYO DE RECTIFICADO Ti6Al4V

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



Fecha, hora: 22.03.2000, 20:38
Observación: TiVw170ae80G3
PIEZA: Cilindro Ti6Al4V- $V_w = 170$ r/min

INSPECTOR: Fernando Sánchez Artola
EQUIPO: Mahr PERTHOMETER PGK 120
PALPADOR: MFW-250

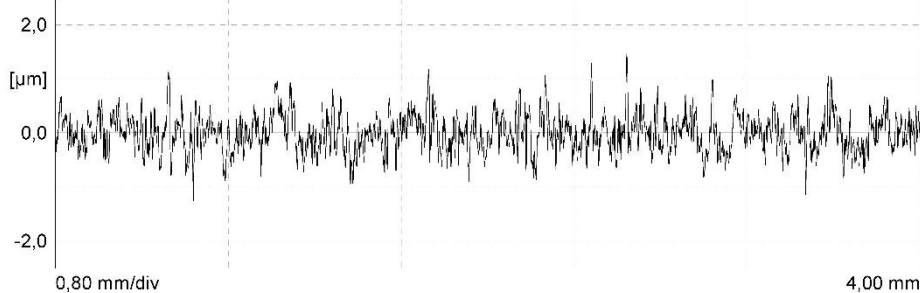
CONDICIONES DE EXPLORACIÓN

LS	2,5	μm
LT	5,60	mm
LM	4,00	mm
Z	5	
VB	$\pm 250,0$	μm

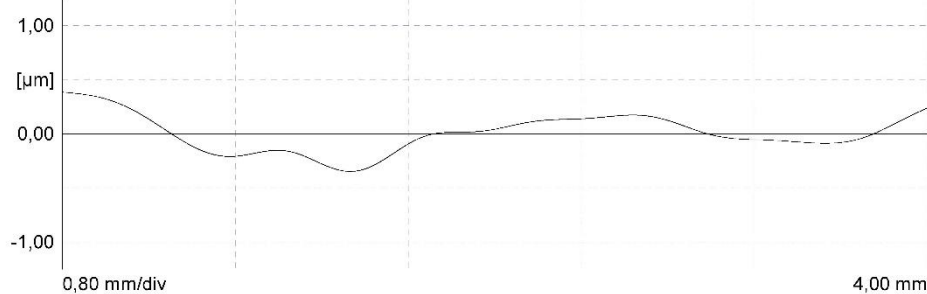
PARÁMETROS DE RUGOSIDAD

Ra	0,27	μm
Rz	2,17	μm
Rq	0,34	μm
Rp	1,15	μm
R Sm	---	μm

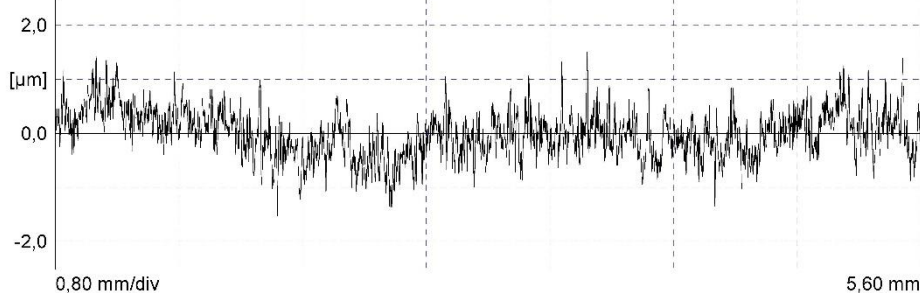
Perfil: R [LC GS 0,80 mm]



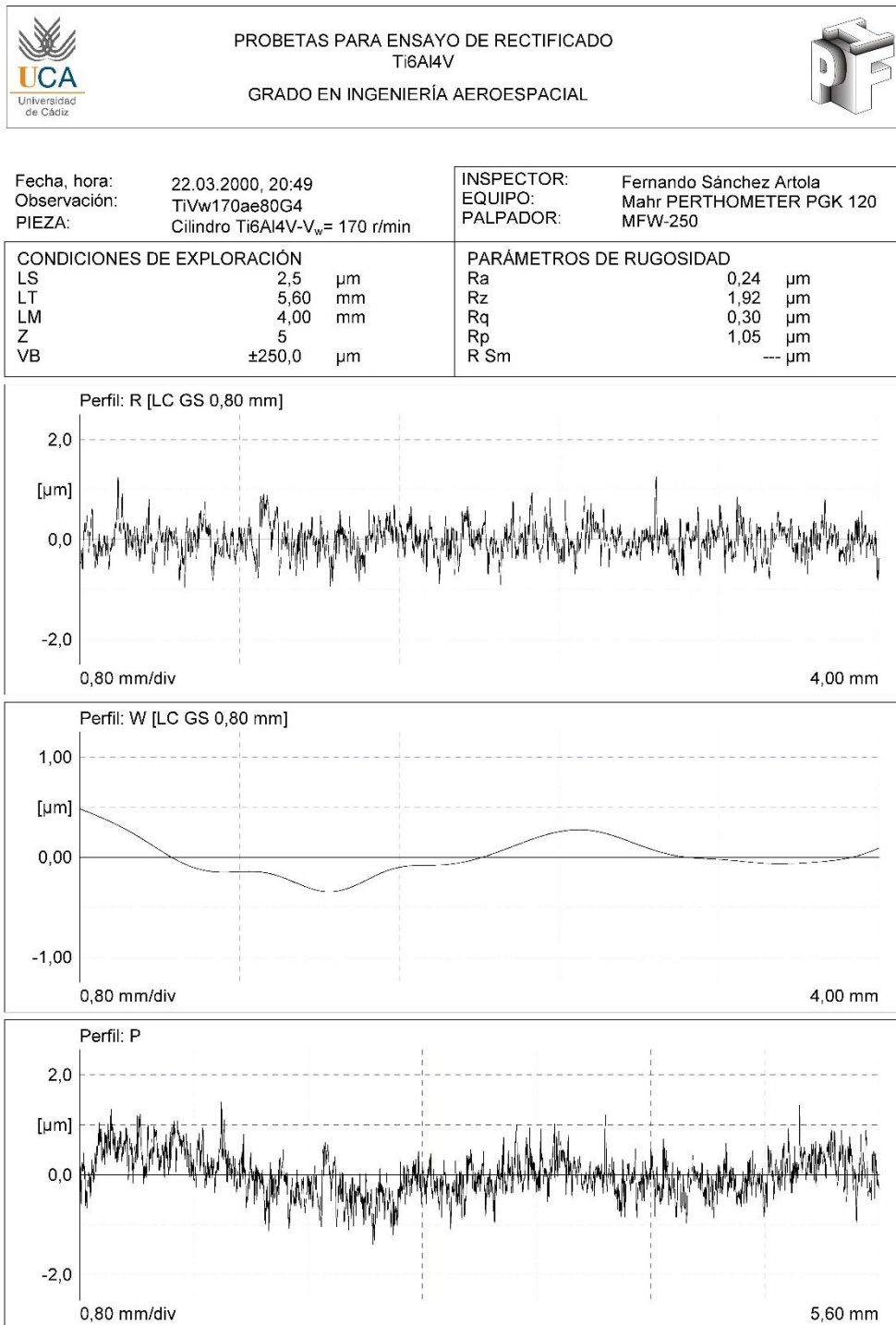
Perfil: W [LC GS 0,80 mm]



Perfil: P



ANEXOS



ANEXOS



PROBETAS PARA ENSAYO DE RECTIFICADO Ti6Al4V

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



Fecha, hora: 22.03.2000, 19:14
Observación: TiVw230ae0G1
PIEZA: Cilindro Ti6Al4V- $V_w = 230$ r/min

INSPECTOR: Fernando Sánchez Artola
EQUIPO: Mahr PERTHOMETER PGK 120
PALPADOR: MFW-250

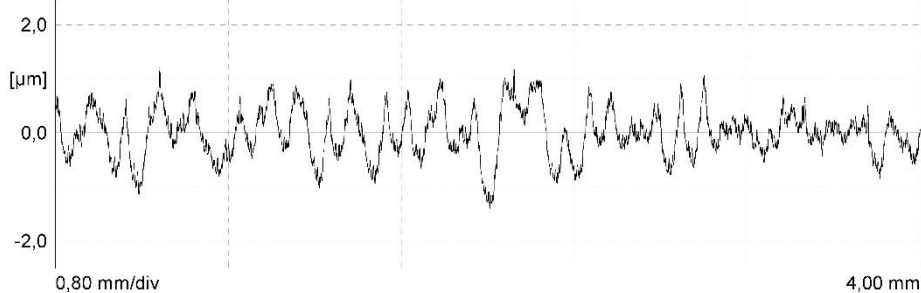
CONDICIONES DE EXPLORACIÓN

LS	2,5	μm
LT	5,60	mm
LM	4,00	mm
Z	5	
VB	$\pm 250,0$	μm

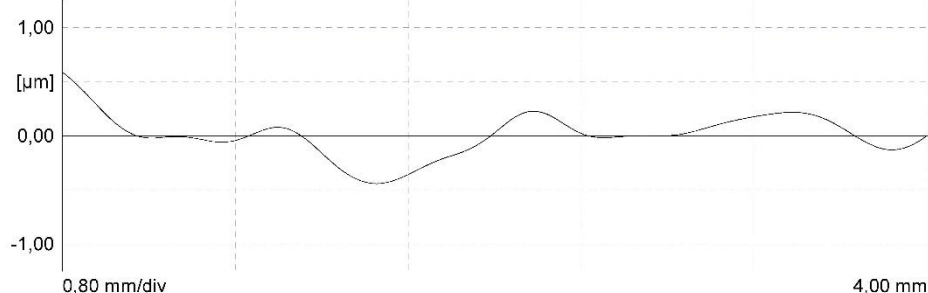
PARÁMETROS DE RUGOSIDAD

Ra	0,36	μm
Rz	2,09	μm
Rq	0,45	μm
Rp	1,03	μm
R Sm	---	μm

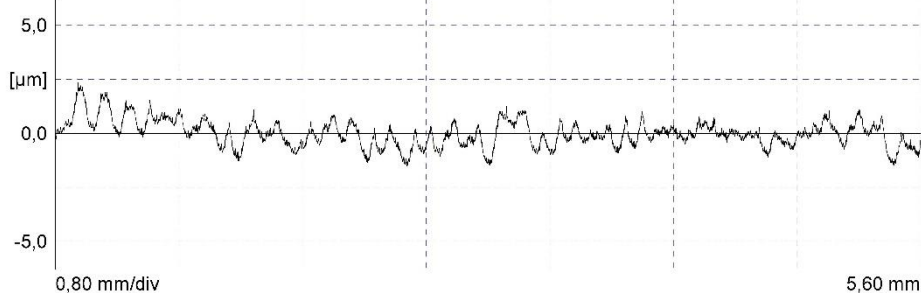
Perfil: R [LC GS 0,80 mm]



Perfil: W [LC GS 0,80 mm]



Perfil: P



ANEXOS



PROBETAS PARA ENSAYO DE RECTIFICADO Ti6Al4V

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



Fecha, hora: 22.03.2000, 19:28
Observación: TiVw230ae0G2
PIEZA: Cilindro Ti6Al4V- $V_w = 230$ r/min

INSPECTOR: Fernando Sánchez Artola
EQUIPO: Mahr PERTHOMETER PGK 120
PALPADOR: MFW-250

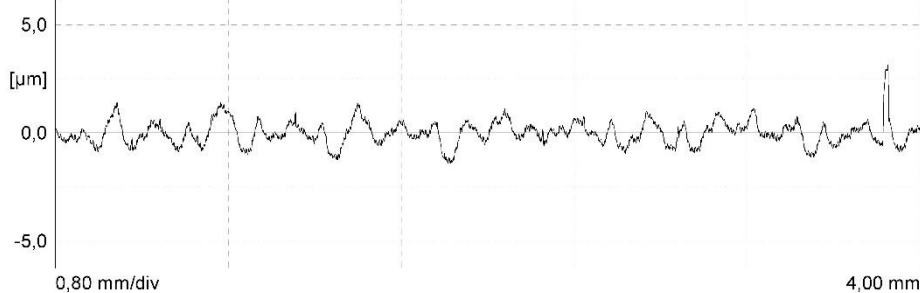
CONDICIONES DE EXPLORACIÓN

LS	2,5	μm
LT	5,60	mm
LM	4,00	mm
Z	5	
VB	$\pm 250,0$	μm

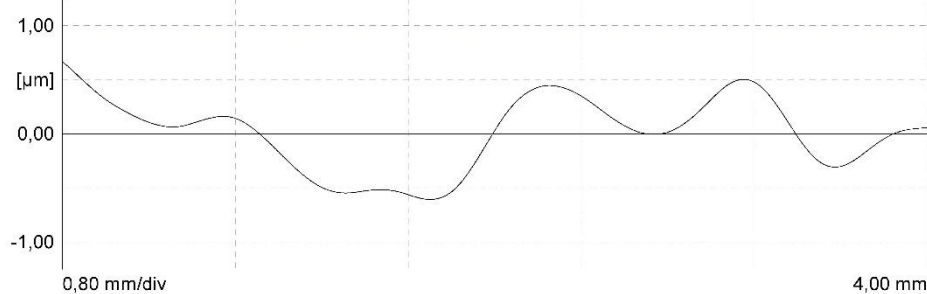
PARÁMETROS DE RUGOSIDAD

Ra	0,42	μm
Rz	2,72	μm
Rq	0,55	μm
Rp	1,60	μm
R Sm	---	μm

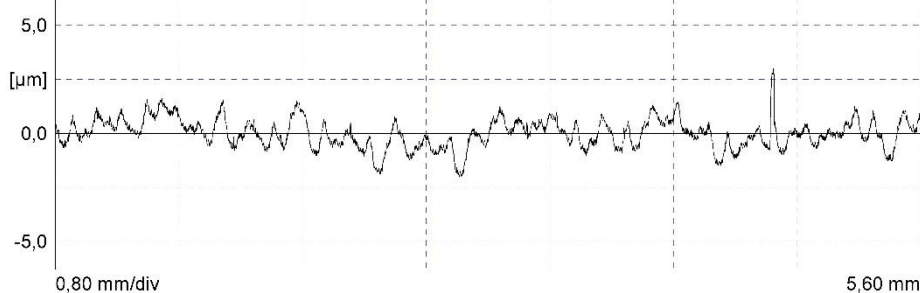
Perfil: R [LC GS 0,80 mm]



Perfil: W [LC GS 0,80 mm]



Perfil: P



ANEXOS



PROBETAS PARA ENSAYO DE RECTIFICADO Ti6Al4V

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



Fecha, hora: 22.03.2000, 19:39
Observación: TiVw230ae0G3
PIEZA: Cilindro Ti6Al4V- $V_w = 230$ r/min

INSPECTOR: Fernando Sánchez Artola
EQUIPO: Mahr PERTHOMETER PGK 120
PALPADOR: MFW-250

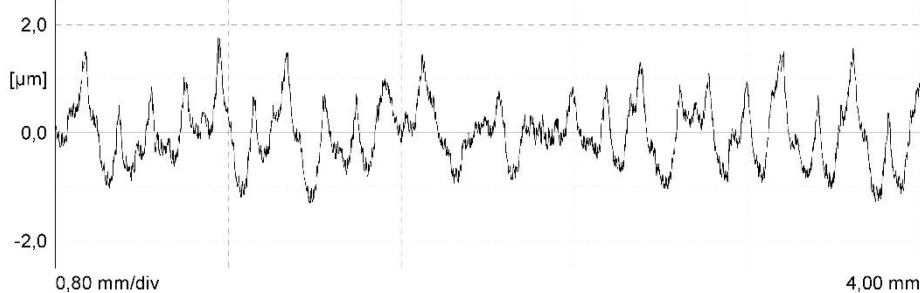
CONDICIONES DE EXPLORACIÓN

LS	2,5	μm
LT	5,60	mm
LM	4,00	mm
Z	5	
VB	$\pm 250,0$	μm

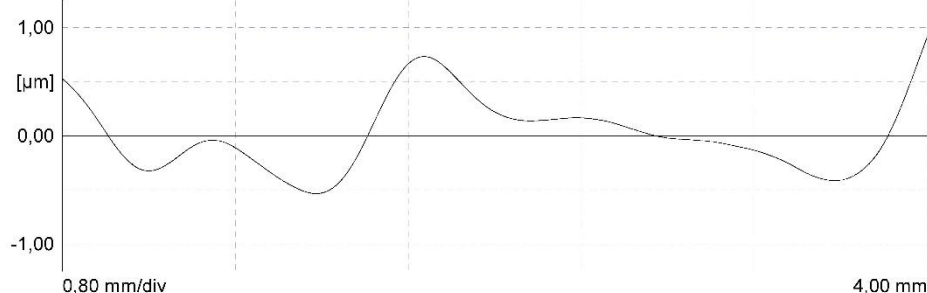
PARÁMETROS DE RUGOSIDAD

Ra	0,47	μm
Rz	2,63	μm
Rq	0,58	μm
Rp	1,52	μm
R Sm	---	μm

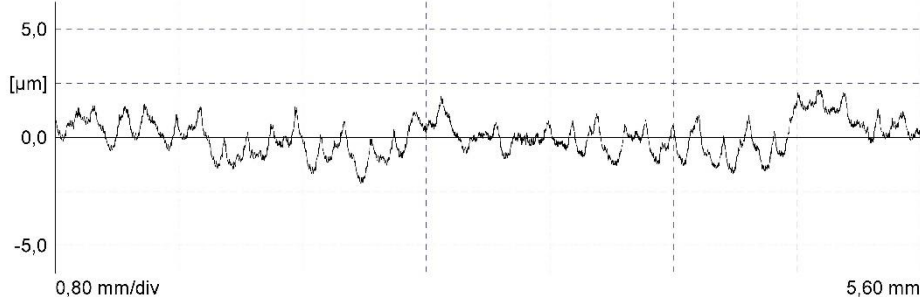
Perfil: R [LC GS 0,80 mm]



Perfil: W [LC GS 0,80 mm]



Perfil: P



ANEXOS



PROBETAS PARA ENSAYO DE RECTIFICADO
Ti6Al4V

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



Fecha, hora: 22.03.2000, 19:50
Observación: TiVw230ae0G4
PIEZA: Cilindro Ti6Al4V- $V_w = 230$ r/min

INSPECTOR: Fernando Sánchez Artola
EQUIPO: Mahr PERTHOMETER PGK 120
PALPADOR: MFW-250

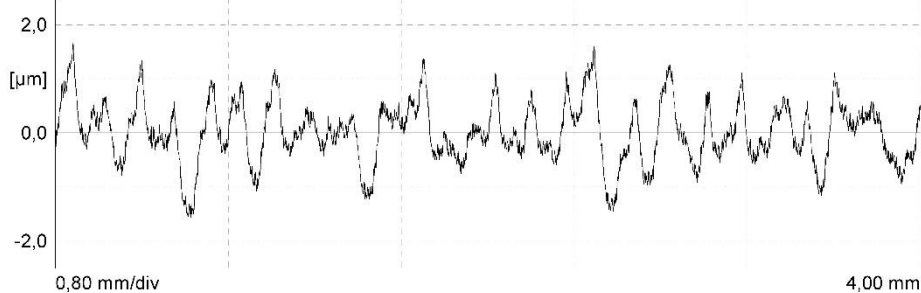
CONDICIONES DE EXPLORACIÓN

LS	2,5	μm
LT	5,60	mm
LM	4,00	mm
Z	5	
VB	$\pm 250,0$	μm

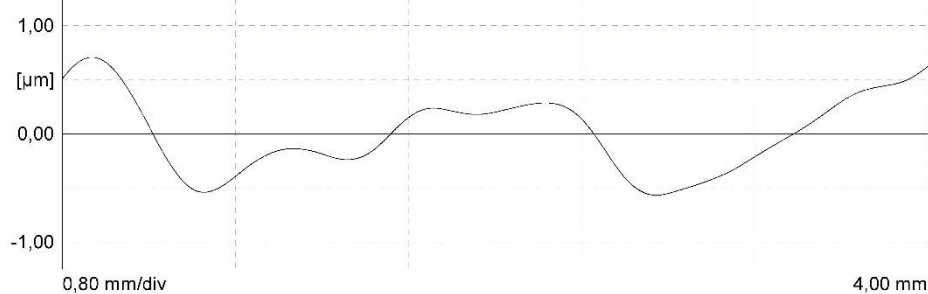
PARÁMETROS DE RUGOSIDAD

Ra	0,44	μm
Rz	2,61	μm
Rq	0,56	μm
Rp	1,38	μm
R Sm	---	μm

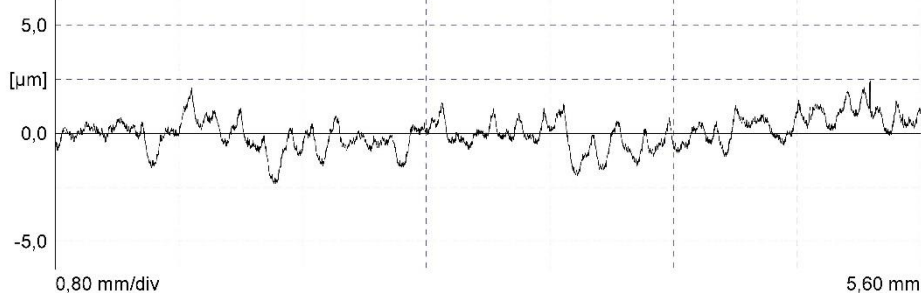
Perfil: R [LC GS 0,80 mm]



Perfil: W [LC GS 0,80 mm]



Perfil: P



ANEXOS



PROBETAS PARA ENSAYO DE RECTIFICADO Ti6Al4V

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



Fecha, hora: 22.03.2000, 19:01
Observación: TiVw230ae20G1
PIEZA: Cilindro Ti6Al4V- $V_w = 230$ r/min

INSPECTOR: Fernando Sánchez Artola
EQUIPO: Mahr PERTHOMETER PGK 120
PALPADOR: MFW-250

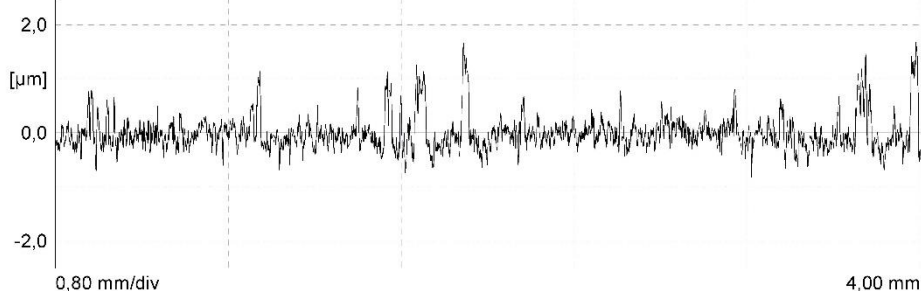
CONDICIONES DE EXPLORACIÓN

LS	2,5	μm
LT	5,60	mm
LM	4,00	mm
Z	5	
VB	$\pm 250,0$	μm

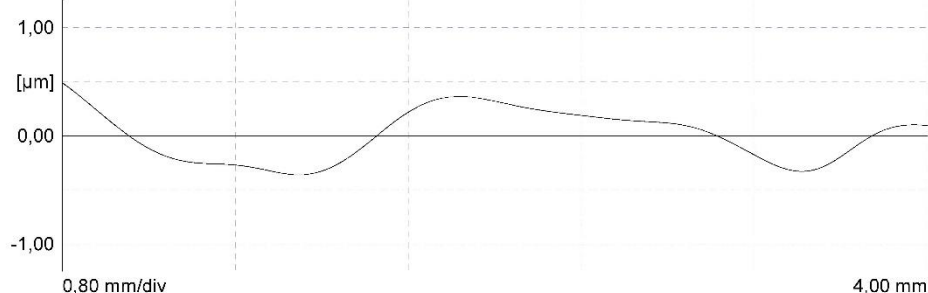
PARÁMETROS DE RUGOSIDAD

Ra	0,22	μm
Rz	1,90	μm
Rq	0,32	μm
Rp	1,21	μm
R Sm	---	μm

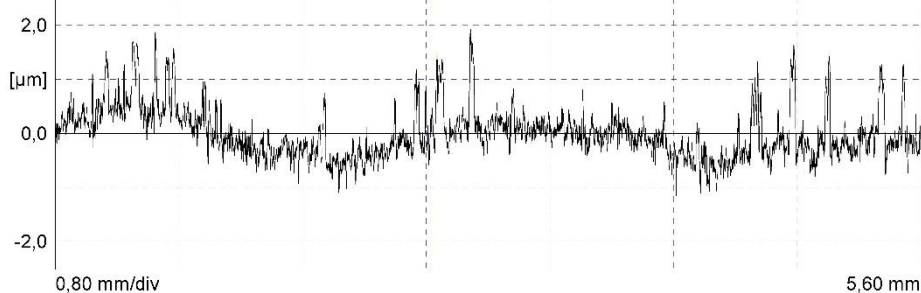
Perfil: R [LC GS 0,80 mm]



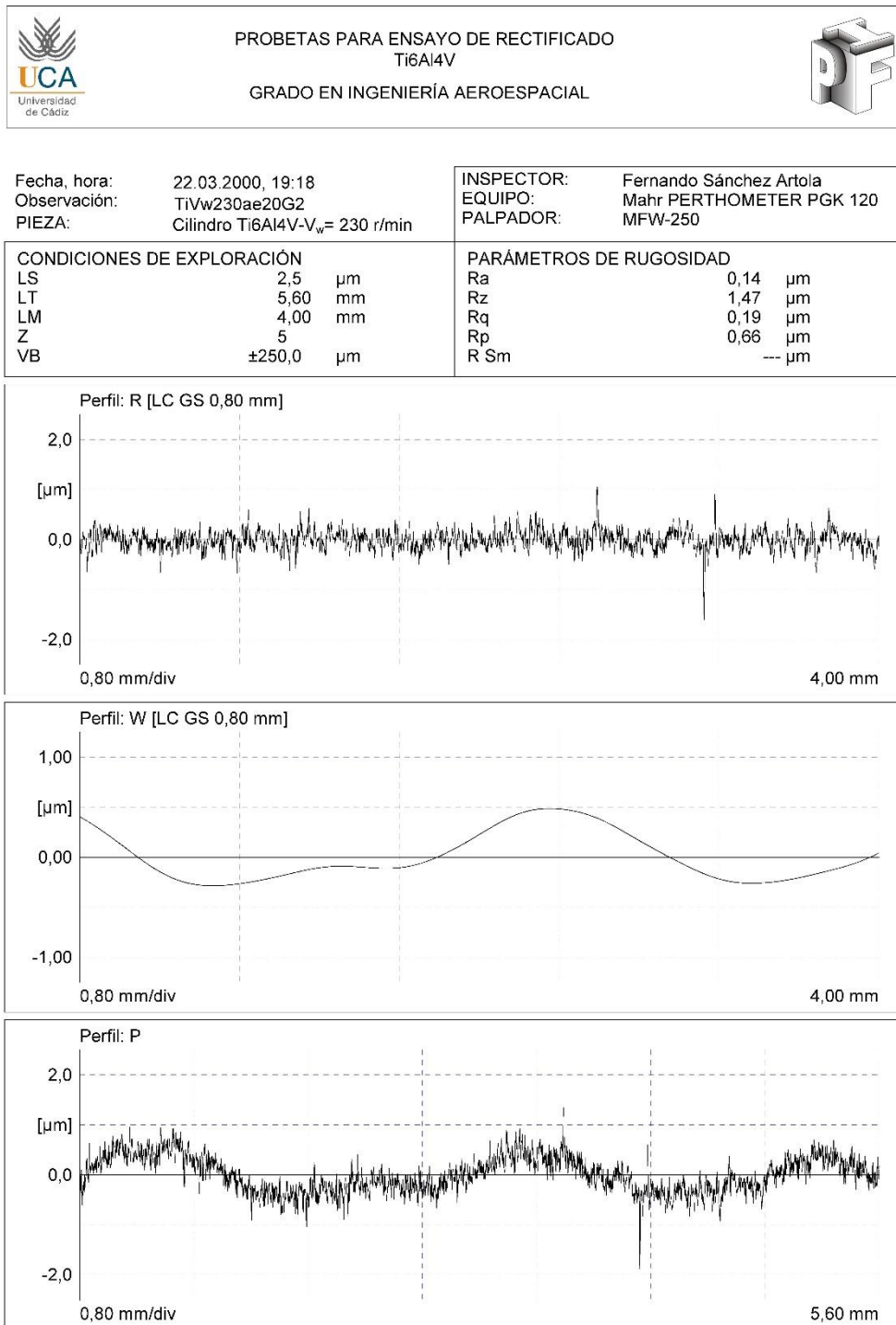
Perfil: W [LC GS 0,80 mm]



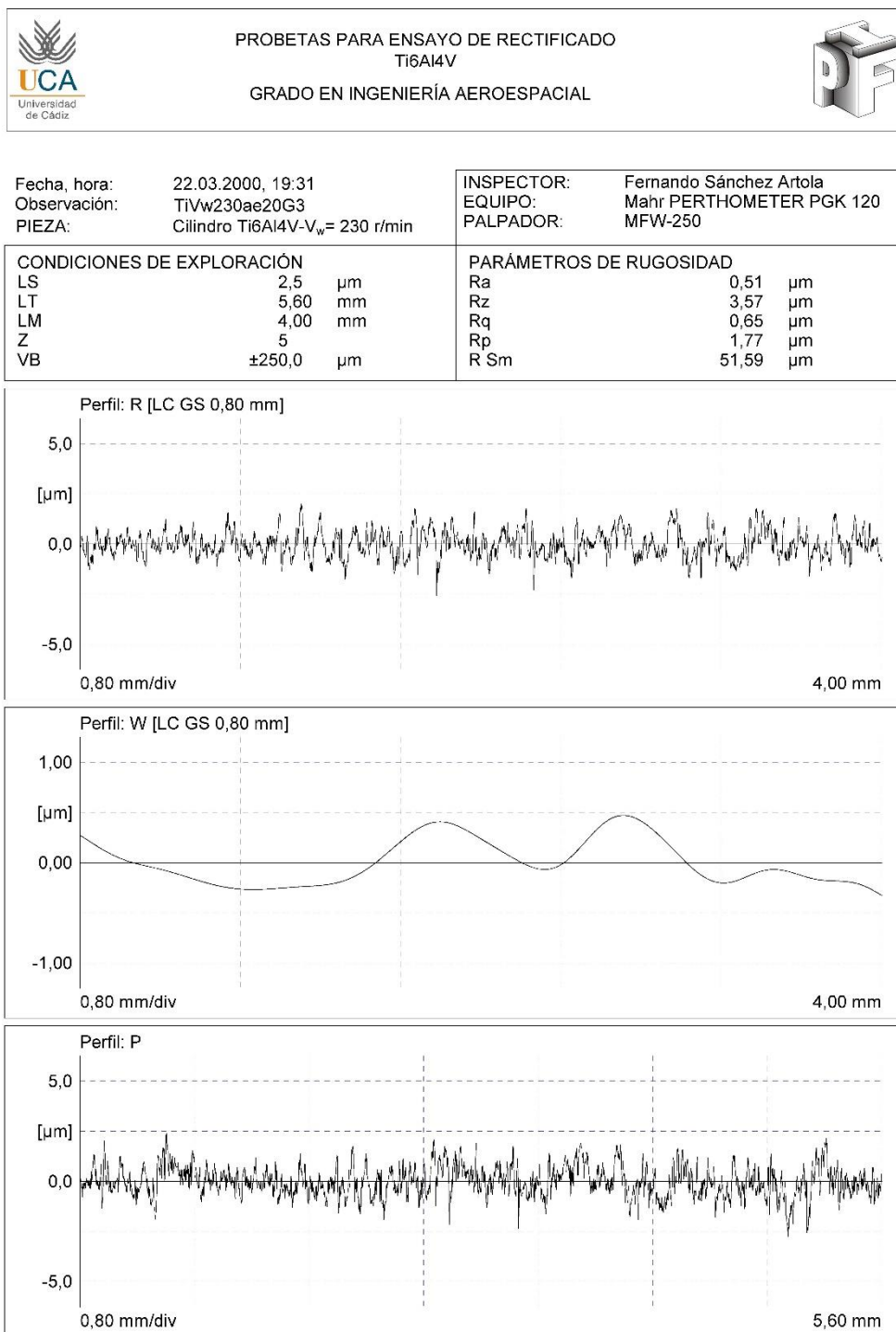
Perfil: P



ANEXOS



ANEXOS



ANEXOS



PROBETAS PARA ENSAYO DE RECTIFICADO Ti6Al4V GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



Fecha, hora: 22.03.2000, 19:42
Observación: TiVw230ae20G4
PIEZA: Cilindro Ti6Al4V- $V_w = 230$ r/min

INSPECTOR: Fernando Sánchez Artola
EQUIPO: Mahr PERTHOMETER PGK 120
PALPADOR: MFV-250

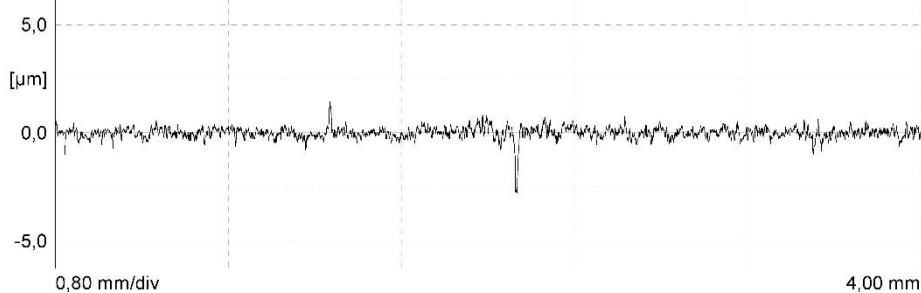
CONDICIONES DE EXPLORACIÓN

LS	2,5	μm
LT	5,60	mm
LM	4,00	mm
Z	5	
VB	$\pm 250,0$	μm

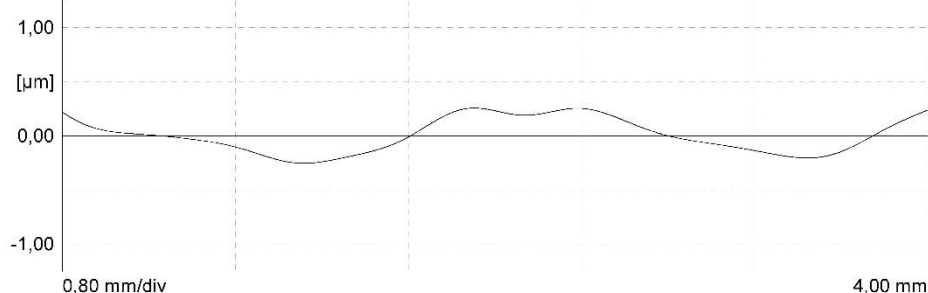
PARÁMETROS DE RUGOSIDAD

Ra	0,18	μm
Rz	2,07	μm
Rq	0,27	μm
Rp	0,85	μm
R Sm	---	μm

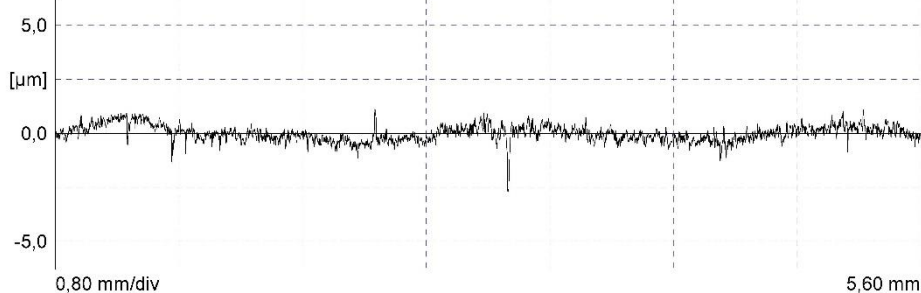
Perfil: R [LC GS 0,80 mm]



Perfil: W [LC GS 0,80 mm]



Perfil: P



ANEXOS



PROBETAS PARA ENSAYO DE RECTIFICADO Ti6Al4V GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



Fecha, hora: 22.03.2000, 19:03
Observación: TiVw230ae40G1
PIEZA: Cilindro Ti6Al4V- $V_w = 230$ r/min

INSPECTOR: Fernando Sánchez Artola
EQUIPO: Mahr PERTHOMETER PGK 120
PALPADOR: MFW-250

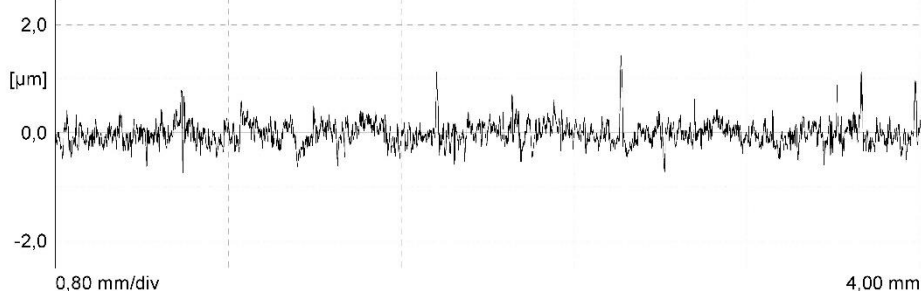
CONDICIONES DE EXPLORACIÓN

LS	2,5	μm
LT	5,60	mm
LM	4,00	mm
Z	5	
VB	$\pm 250,0$	μm

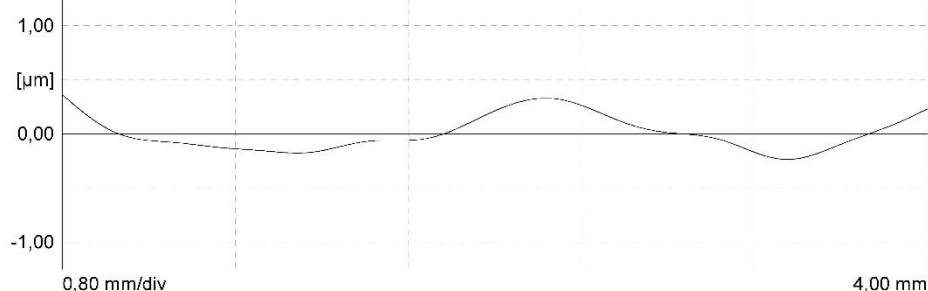
PARÁMETROS DE RUGOSIDAD

Ra	0,16	μm
Rz	1,67	μm
Rq	0,21	μm
Rp	1,02	μm
R Sm	---	μm

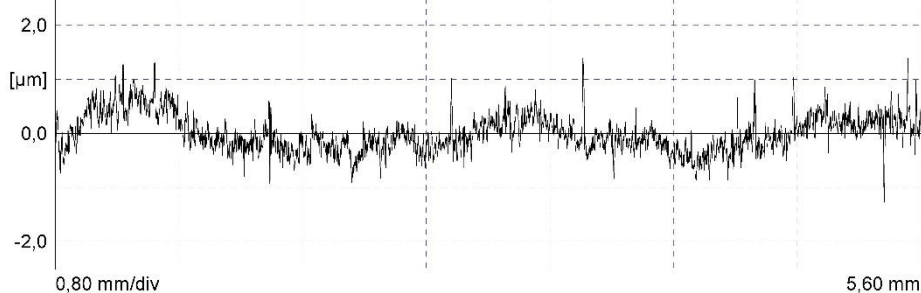
Perfil: R [LC GS 0,80 mm]



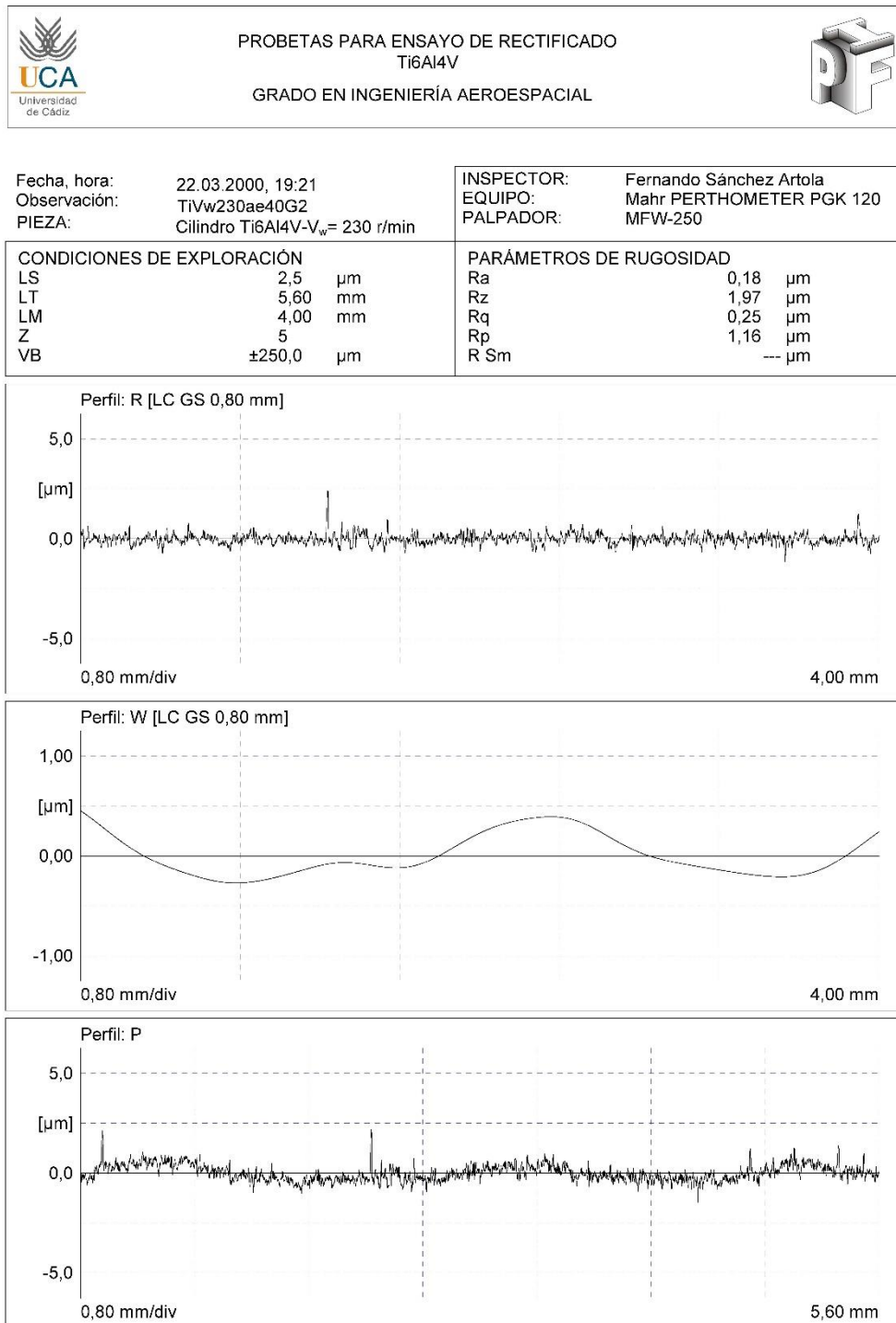
Perfil: W [LC GS 0,80 mm]



Perfil: P



ANEXOS



ANEXOS



PROBETAS PARA ENSAYO DE RECTIFICADO
Ti6Al4V

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



Fecha, hora: 22.03.2000, 19:33
Observación: TiVw230ae40G3
PIEZA: Cilindro Ti6Al4V- $V_w = 230$ r/min

INSPECTOR: Fernando Sánchez Artola
EQUIPO: Mahr PERTHOMETER PGK 120
PALPADOR: MFW-250

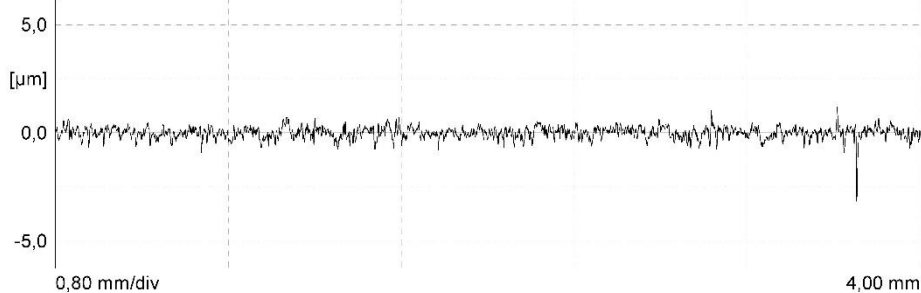
CONDICIONES DE EXPLORACIÓN

LS	2,5	μm
LT	5,60	mm
LM	4,00	mm
Z	5	
VB	$\pm 250,0$	μm

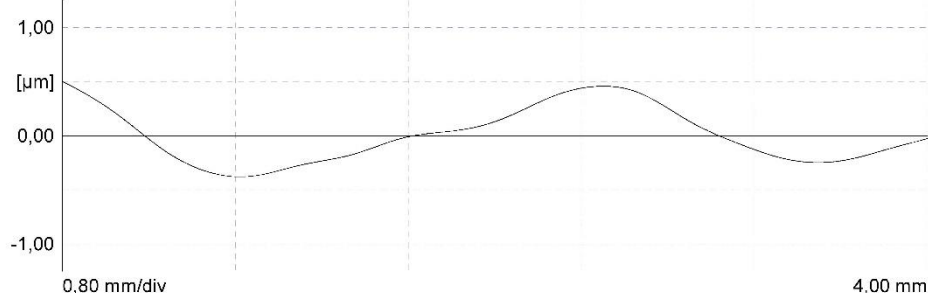
PARÁMETROS DE RUGOSIDAD

Ra	0,20	μm
Rz	2,10	μm
Rq	0,27	μm
Rp	0,83	μm
R Sm	---	μm

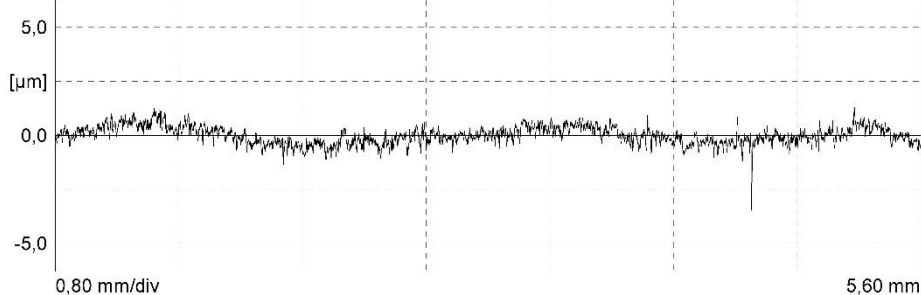
Perfil: R [LC GS 0,80 mm]



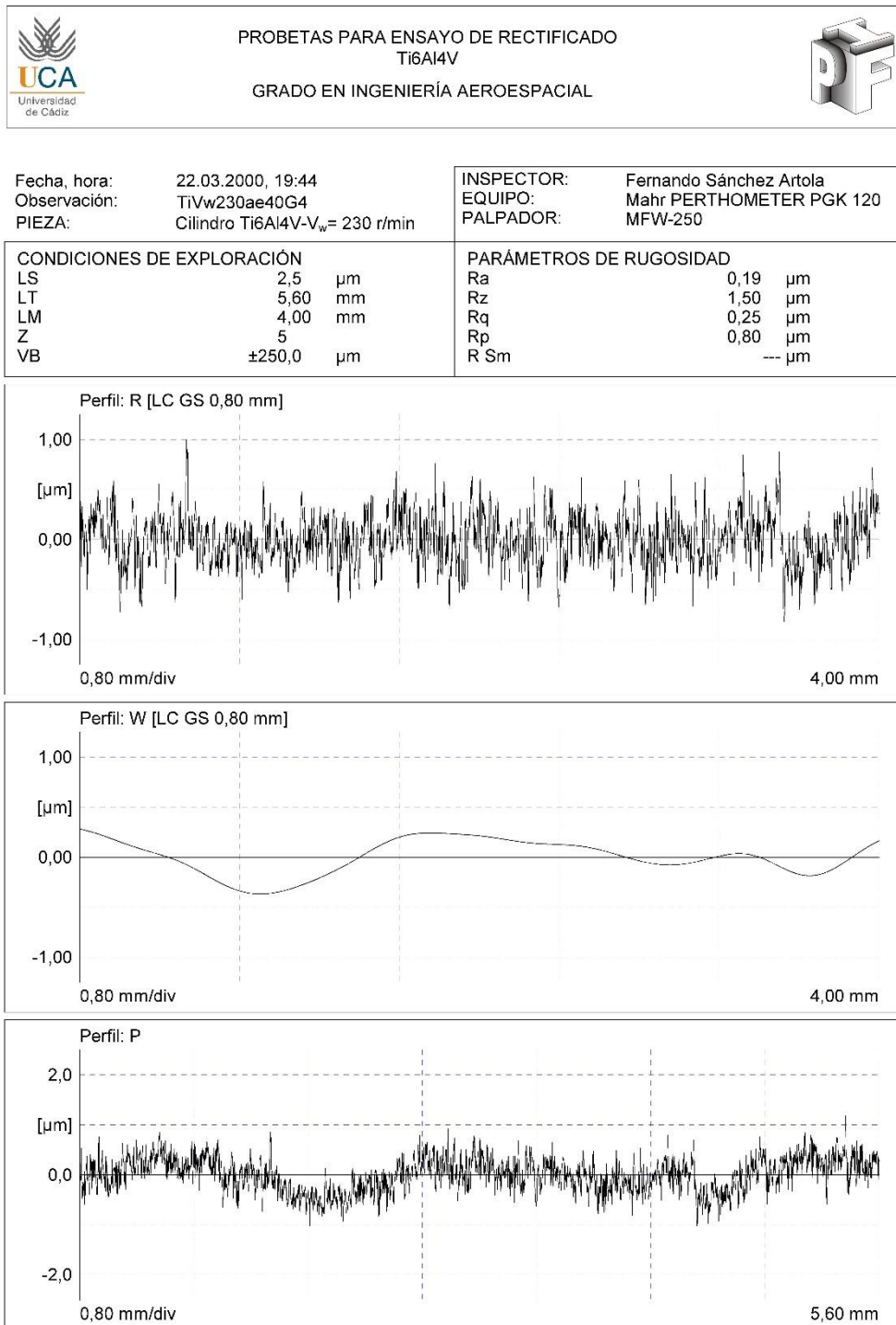
Perfil: W [LC GS 0,80 mm]



Perfil: P



ANEXOS



ANEXOS



PROBETAS PARA ENSAYO DE RECTIFICADO
Ti6Al4V

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



Fecha, hora: 22.03.2000, 19:08
Observación: TiVw230ae80G1
PIEZA: Cilindro Ti6Al4V- $V_w = 230$ r/min

INSPECTOR: Fernando Sánchez Artola
EQUIPO: Mahr PERTHOMETER PGK 120
PALPADOR: MFW-250

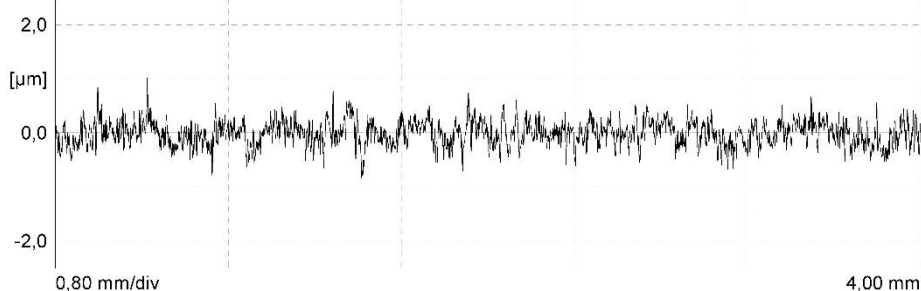
CONDICIONES DE EXPLORACIÓN

LS	2,5	μm
LT	5,60	mm
LM	4,00	mm
Z	5	
VB	$\pm 250,0$	μm

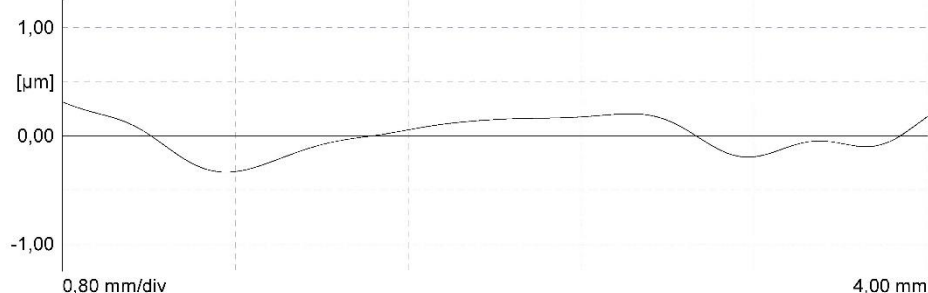
PARÁMETROS DE RUGOSIDAD

Ra	0,18	μm
Rz	1,45	μm
Rq	0,22	μm
Rp	0,74	μm
R Sm	---	μm

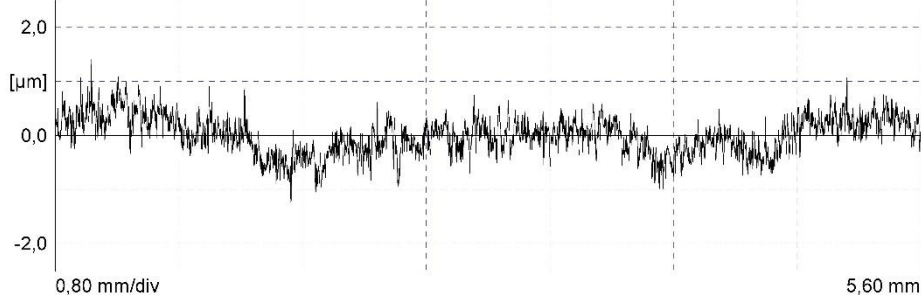
Perfil: R [LC GS 0,80 mm]



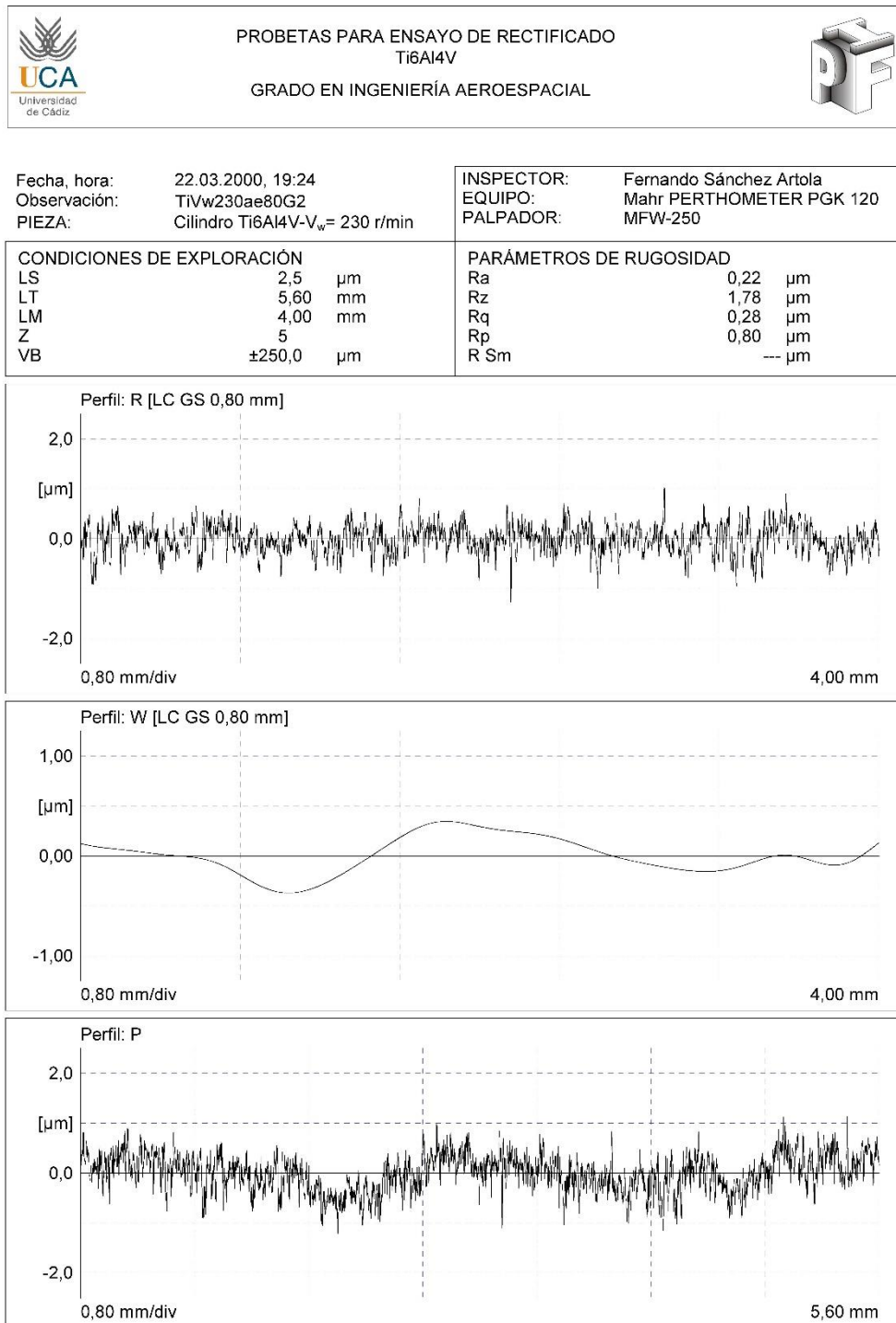
Perfil: W [LC GS 0,80 mm]



Perfil: P



ANEXOS



ANEXOS



PROBETAS PARA ENSAYO DE RECTIFICADO
Ti6Al4V

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



Fecha, hora: 22.03.2000, 19:35
Observación: TiVw230ae80G3
PIEZA: Cilindro Ti6Al4V- $V_w = 230$ r/min

INSPECTOR: Fernando Sánchez Artola
EQUIPO: Mahr PERTHOMETER PGK 120
PALPADOR: MFW-250

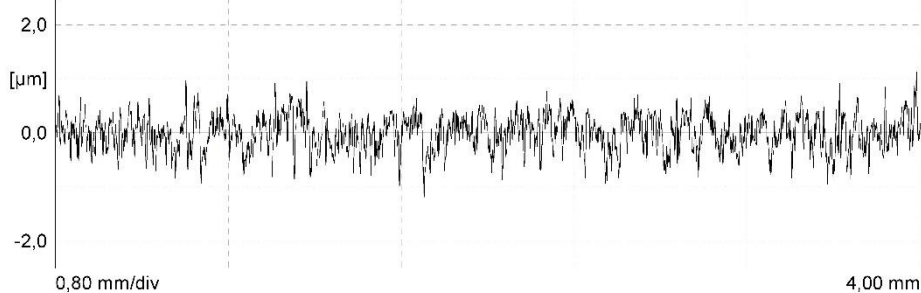
CONDICIONES DE EXPLORACIÓN

LS	2,5	μm
LT	5,60	mm
LM	4,00	mm
Z	5	
VB	$\pm 250,0$	μm

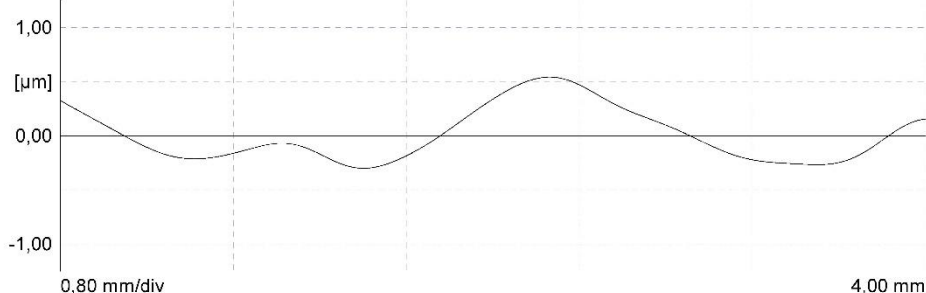
PARÁMETROS DE RUGOSIDAD

Ra	0,25	μm
Rz	1,90	μm
Rq	0,32	μm
Rp	0,91	μm
R Sm	---	μm

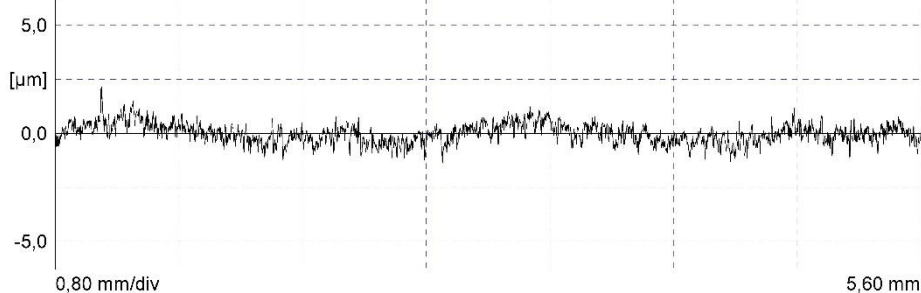
Perfil: R [LC GS 0,80 mm]



Perfil: W [LC GS 0,80 mm]



Perfil: P



ANEXOS



PROBETAS PARA ENSAYO DE RECTIFICADO
Ti6Al4V

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



Fecha, hora: 22.03.2000, 19:46
Observación: TiVw230ae80G4
PIEZA: Cilindro Ti6Al4V- $V_w = 230$ r/min

INSPECTOR: Fernando Sánchez Artola
EQUIPO: Mahr PERTHOMETER PGK 120
PALPADOR: MFW-250

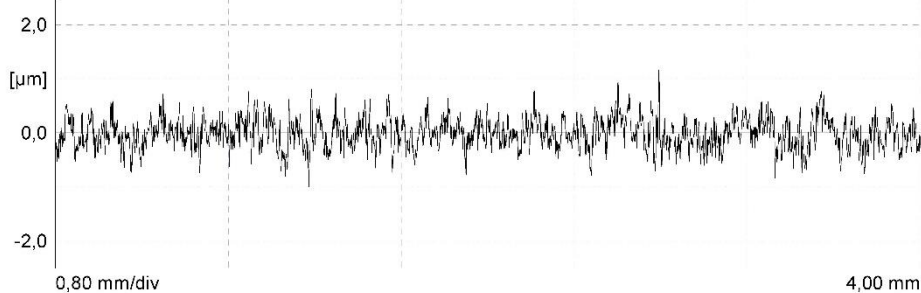
CONDICIONES DE EXPLORACIÓN

LS	2,5	μm
LT	5,60	mm
LM	4,00	mm
Z	5	
VB	$\pm 250,0$	μm

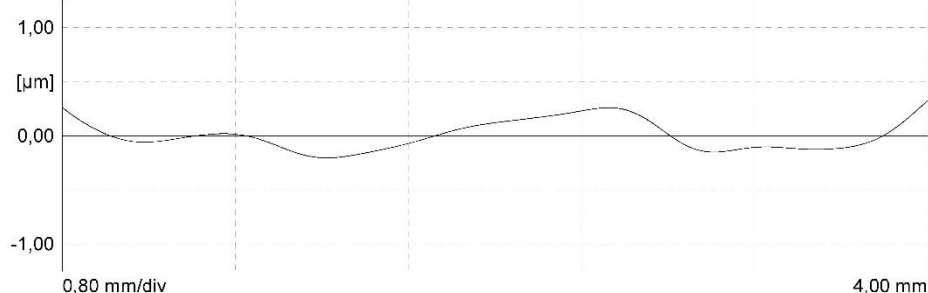
PARÁMETROS DE RUGOSIDAD

Ra	0,22	μm
Rz	1,67	μm
Rq	0,27	μm
Rp	0,85	μm
R Sm	---	μm

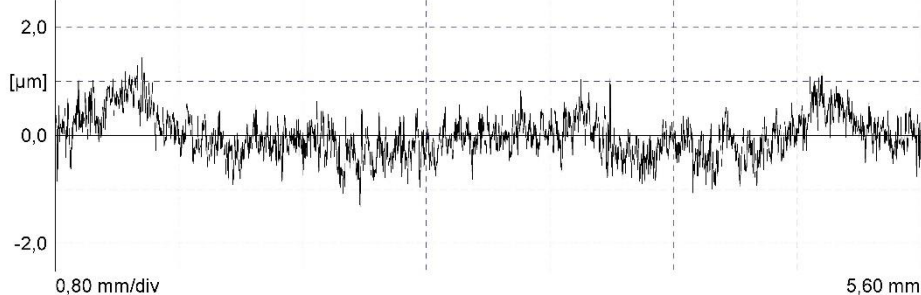
Perfil: R [LC GS 0,80 mm]



Perfil: W [LC GS 0,80 mm]



Perfil: P



ANEXOS



PROBETAS PARA ENSAYO DE RECTIFICADO
Ti6Al4V

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



Fecha, hora: 24.03.2000, 19:45
Observación: TiVw460ae0G1
PIEZA: Cilindro Ti6Al4V- $V_w = 460$ r/min

INSPECTOR: Fernando Sánchez Artola
EQUIPO: Mahr PERTHOMETER PGK 120
PALPADOR: MFW-250

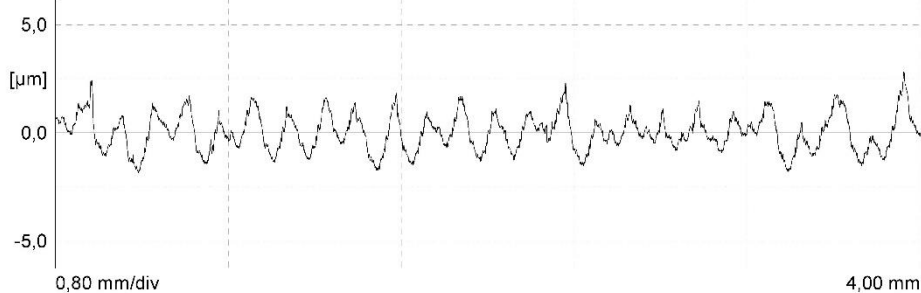
CONDICIONES DE EXPLORACIÓN

LS	2,5	μm
LT	5,60	mm
LM	4,00	mm
Z	5	
VB	$\pm 250,0$	μm

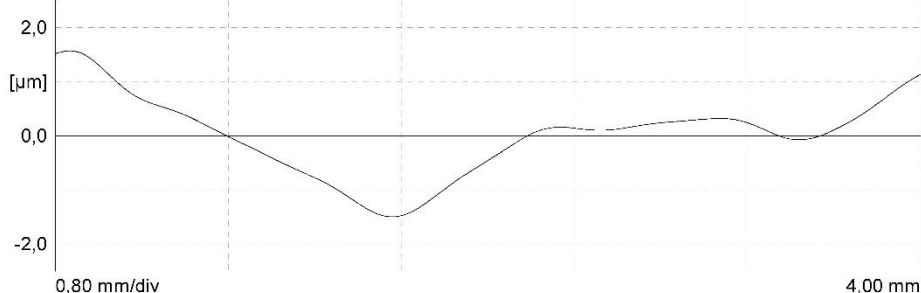
PARÁMETROS DE RUGOSIDAD

Ra	0,68	μm
Rz	3,84	μm
Rq	0,84	μm
Rp	2,17	μm
R Sm	170,81	μm

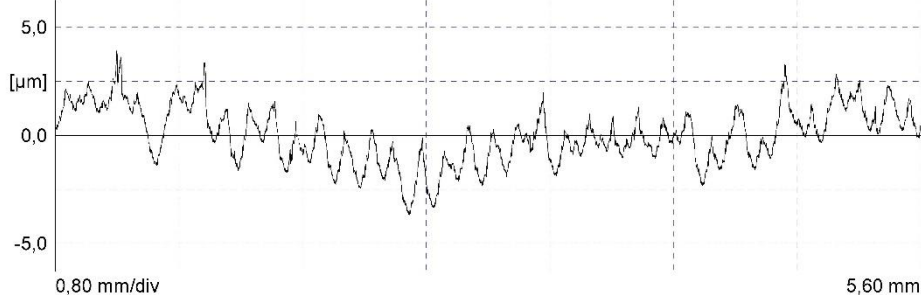
Perfil: R [LC GS 0,80 mm]



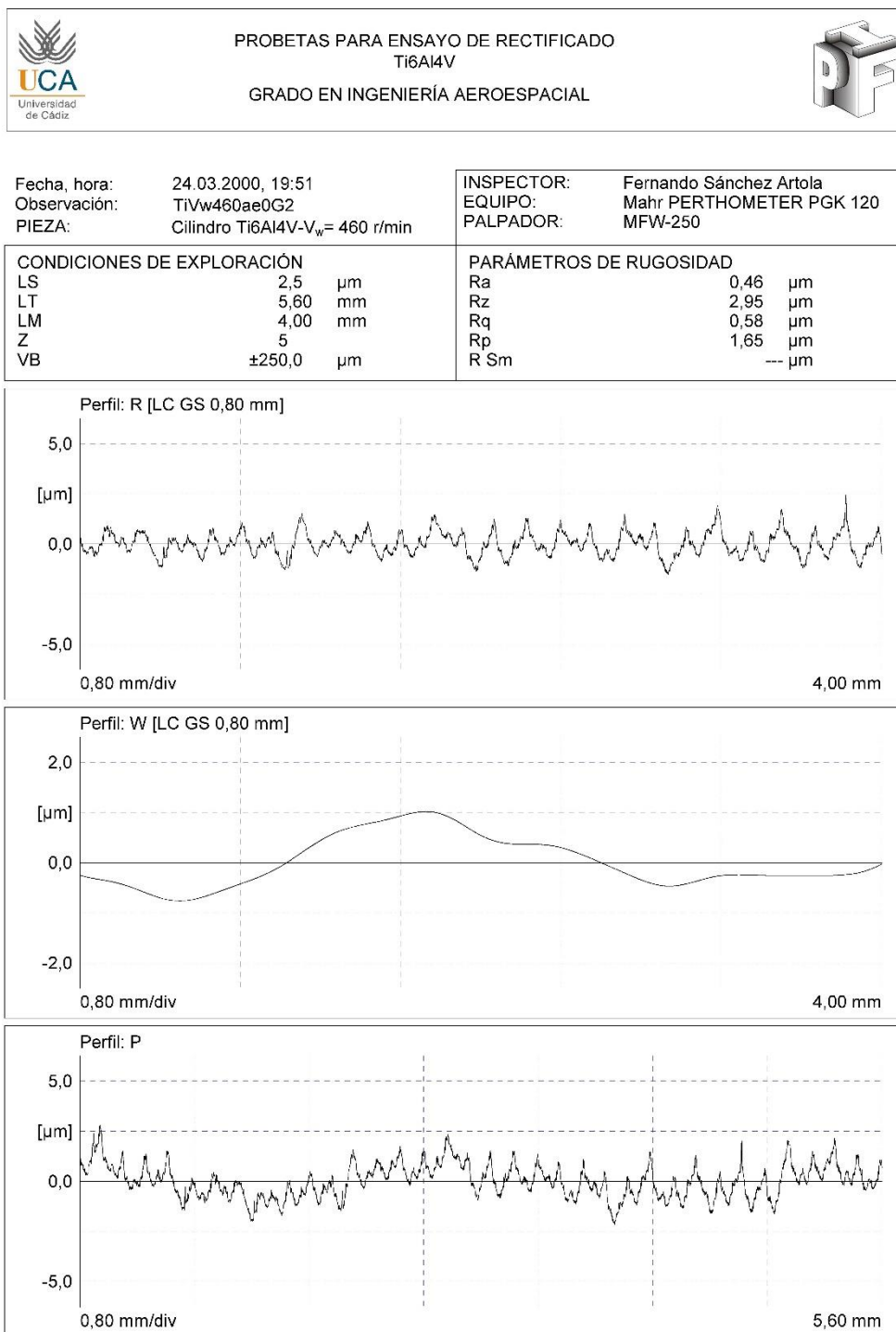
Perfil: W [LC GS 0,80 mm]



Perfil: P



ANEXOS



ANEXOS



PROBETAS PARA ENSAYO DE RECTIFICADO
Ti6Al4V

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



Fecha, hora: 24.03.2000, 19:57
Observación: TiVw460ae0G3
PIEZA: Cilindro Ti6Al4V- $V_w = 460$ r/min

INSPECTOR: Fernando Sánchez Artola
EQUIPO: Mahr PERTHOMETER PGK 120
PALPADOR: MFV-250

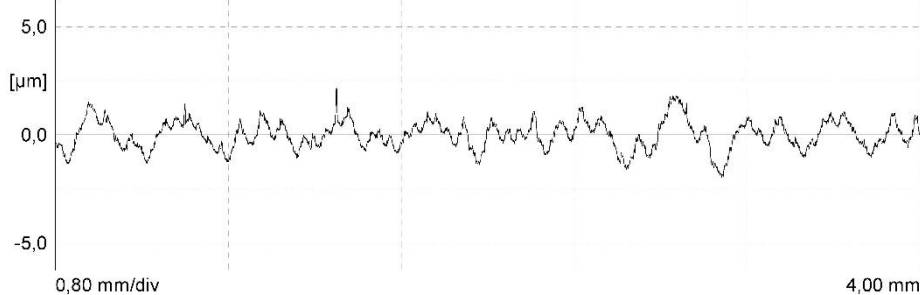
CONDICIONES DE EXPLORACIÓN

LS	2,5	μm
LT	5,60	mm
LM	4,00	mm
Z	5	
VB	$\pm 250,0$	μm

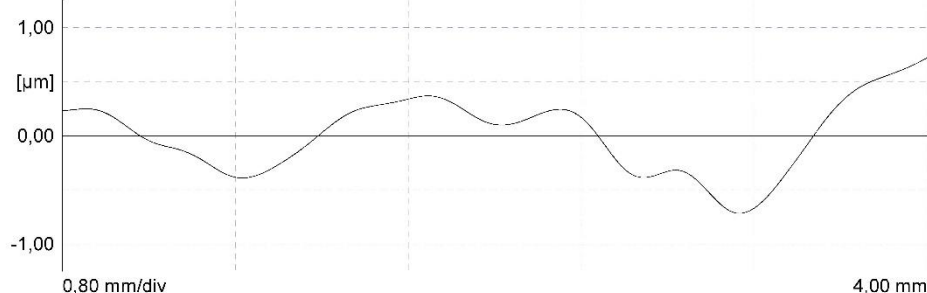
PARÁMETROS DE RUGOSIDAD

Ra	0,52	μm
Rz	2,92	μm
Rq	0,65	μm
Rp	1,53	μm
R Sm	202,89	μm

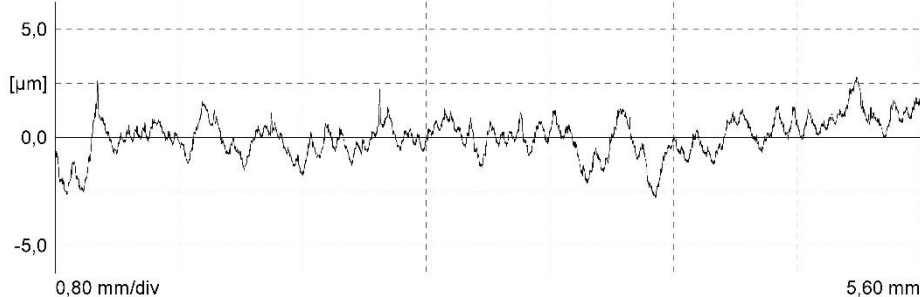
Perfil: R [LC GS 0,80 mm]



Perfil: W [LC GS 0,80 mm]



Perfil: P



ANEXOS



PROBETAS PARA ENSAYO DE RECTIFICADO Ti6Al4V

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



Fecha, hora: 24.03.2000, 20:01
Observación: TiVw460ae0G4
PIEZA: Cilindro Ti6Al4V- $V_w = 460$ r/min

INSPECTOR: Fernando Sánchez Artola
EQUIPO: Mahr PERTHOMETER PGK 120
PALPADOR: MFW-250

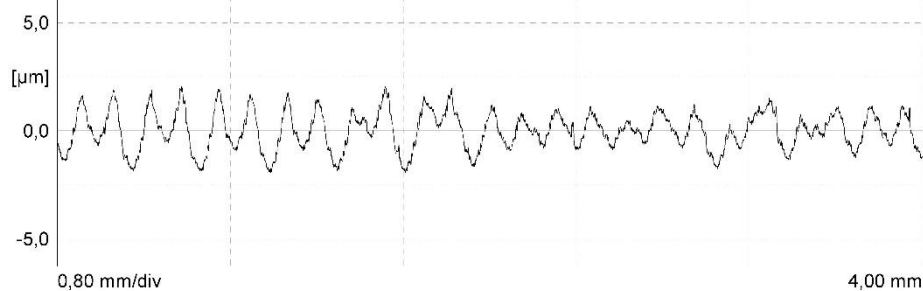
CONDICIONES DE EXPLORACIÓN

LS	2,5	μm
LT	5,60	mm
LM	4,00	mm
Z	5	
VB	$\pm 250,0$	μm

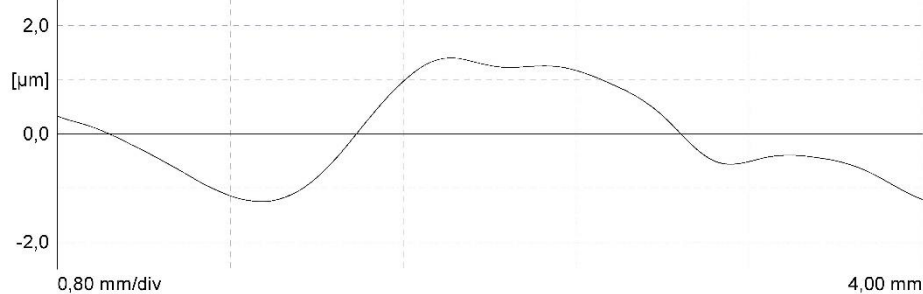
PARÁMETROS DE RUGOSIDAD

Ra	0,71	μm
Rz	3,51	μm
Rq	0,87	μm
Rp	1,75	μm
R Sm	180,81	μm

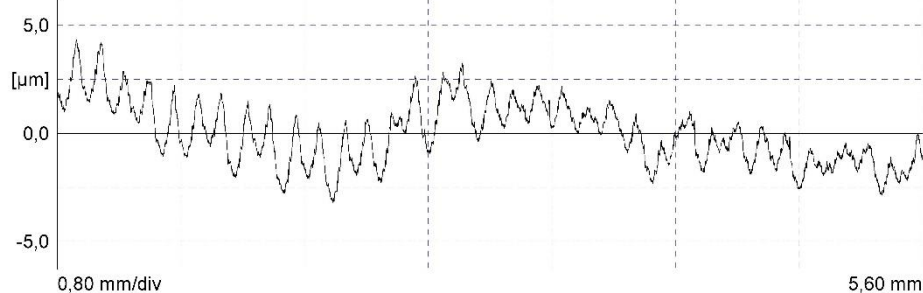
Perfil: R [LC GS 0,80 mm]



Perfil: W [LC GS 0,80 mm]



Perfil: P



ANEXOS



PROBETAS PARA ENSAYO DE RECTIFICADO Ti6Al4V

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



Fecha, hora: 22.03.2000, 18:02
Observación: TiVw460ae20G1
PIEZA: Cilindro Ti6Al4V- $V_w = 460$ r/min

INSPECTOR: Fernando Sánchez Artola
EQUIPO: Mahr PERTHOMETER PGK 120
PALPADOR: MFW-250

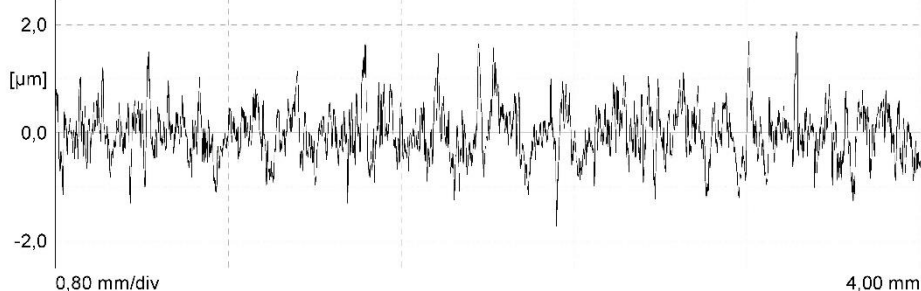
CONDICIONES DE EXPLORACIÓN

LS	2,5	μm
LT	5,60	mm
LM	4,00	mm
Z	5	
VB	$\pm 250,0$	μm

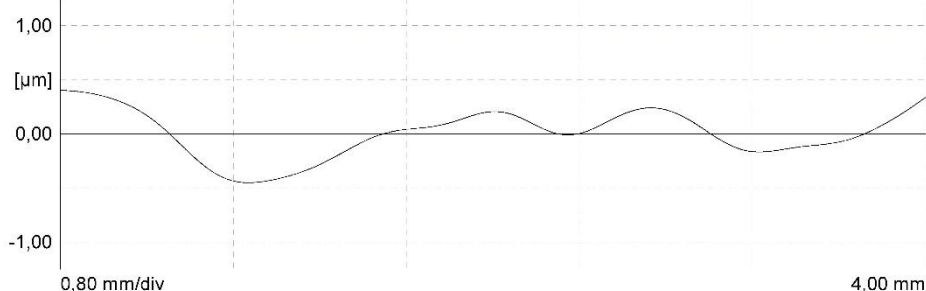
PARÁMETROS DE RUGOSIDAD

Ra	0,37	μm
Rz	2,91	μm
Rq	0,47	μm
Rp	1,55	μm
R Sm	---	μm

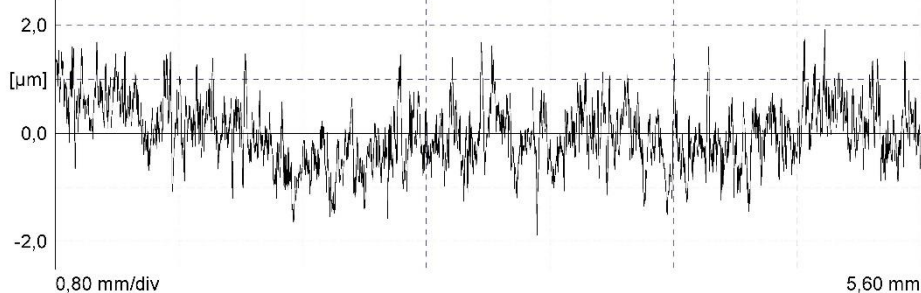
Perfil: R [LC GS 0,80 mm]



Perfil: W [LC GS 0,80 mm]



Perfil: P



ANEXOS



PROBETAS PARA ENSAYO DE RECTIFICADO
Ti6Al4V

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



Fecha, hora: 22.03.2000, 18:31
Observación: TiVw460ae20G2
PIEZA: Cilindro Ti6Al4V- $V_w = 460$ r/min

INSPECTOR: Fernando Sánchez Artola
EQUIPO: Mahr PERTHOMETER PGK 120
PALPADOR: MFW-250

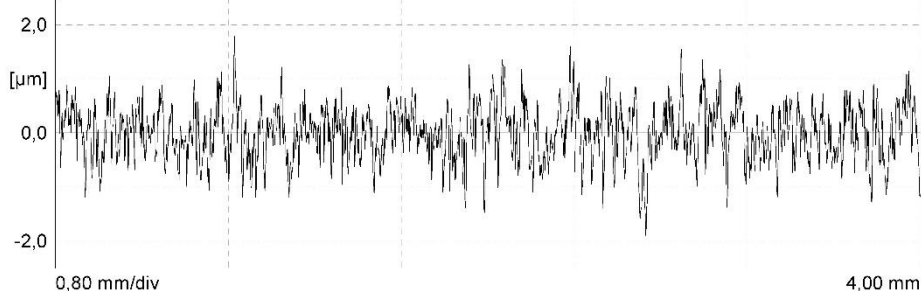
CONDICIONES DE EXPLORACIÓN

LS	2,5	μm
LT	5,60	mm
LM	4,00	mm
Z	5	
VB	$\pm 250,0$	μm

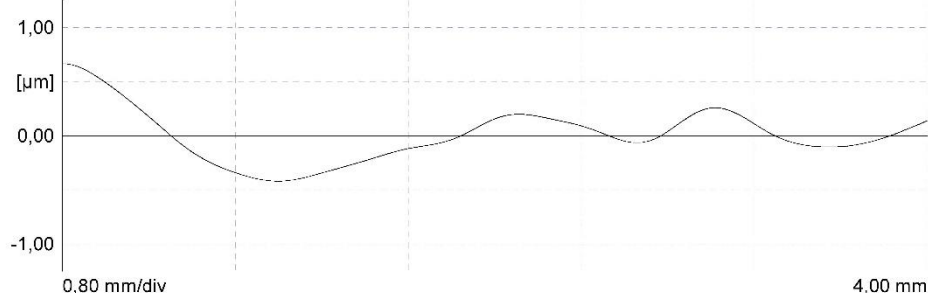
PARÁMETROS DE RUGOSIDAD

Ra	0,39	μm
Rz	2,84	μm
Rq	0,49	μm
Rp	1,44	μm
R Sm	---	μm

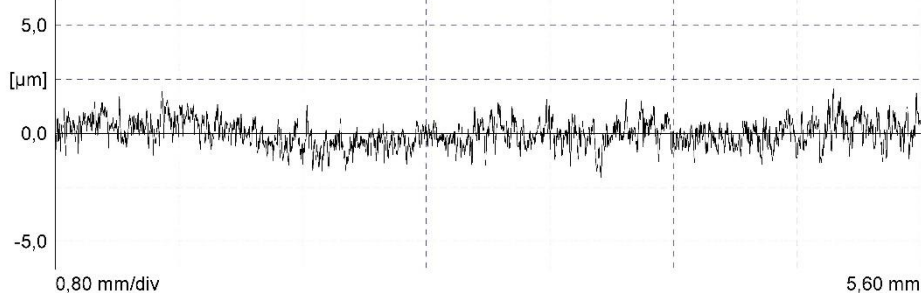
Perfil: R [LC GS 0,80 mm]



Perfil: W [LC GS 0,80 mm]



Perfil: P



ANEXOS



PROBETAS PARA ENSAYO DE RECTIFICADO Ti6Al4V

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



Fecha, hora: 22.03.2000, 18:38
Observación: TiVw460ae20G3
PIEZA: Cilindro Ti6Al4V- $V_w = 460$ r/min

INSPECTOR: Fernando Sánchez Artola
EQUIPO: Mahr PERTHOMETER PGK 120
PALPADOR: MFV-250

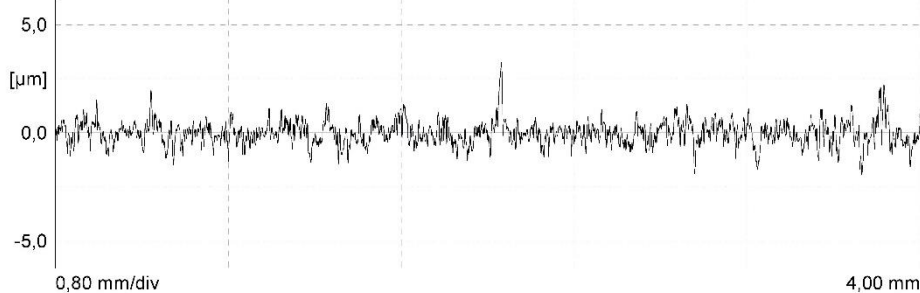
CONDICIONES DE EXPLORACIÓN

LS	2,5	μm
LT	5,60	mm
LM	4,00	mm
Z	5	
VB	$\pm 250,0$	μm

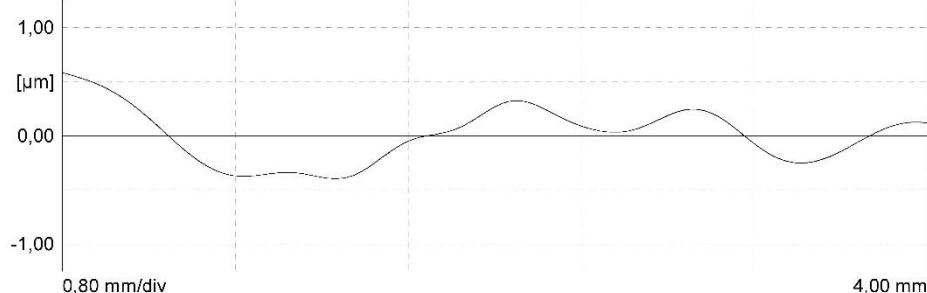
PARÁMETROS DE RUGOSIDAD

Ra	0,40	μm
Rz	3,63	μm
Rq	0,54	μm
Rp	2,02	μm
R Sm	---	μm

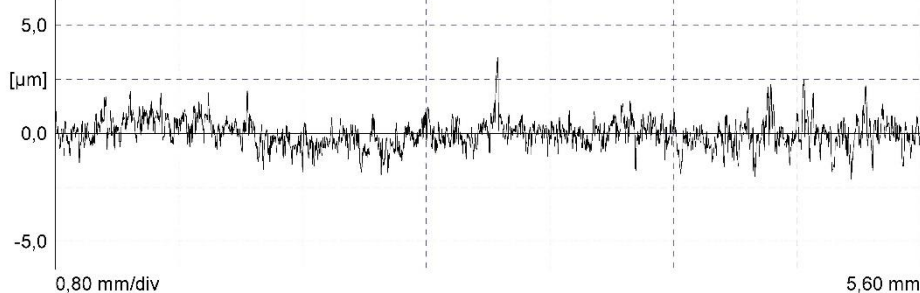
Perfil: R [LC GS 0,80 mm]



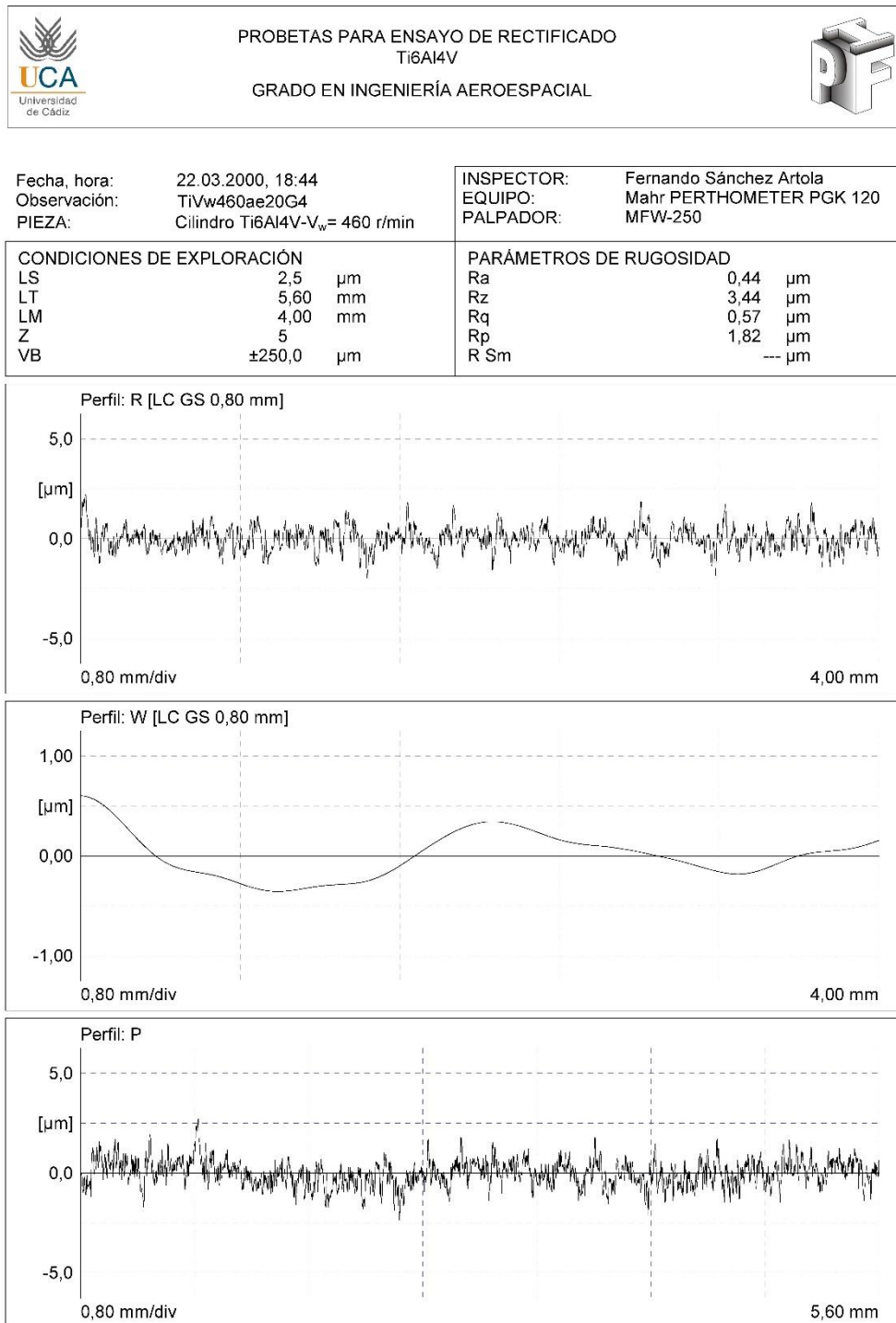
Perfil: W [LC GS 0,80 mm]



Perfil: P



ANEXOS



ANEXOS



PROBETAS PARA ENSAYO DE RECTIFICADO Ti6Al4V

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



Fecha, hora: 22.03.2000, 1U:10
Observación: TiVw460ae40G1
PIEZA: Cilindro Ti6Al4V- $V_w = 460$ r/min

INSPECTOR: Fernando Sánchez Artola
EQUIPO: Mahr PERTHOMETER PGK 120
PALPADOR: MFW-250

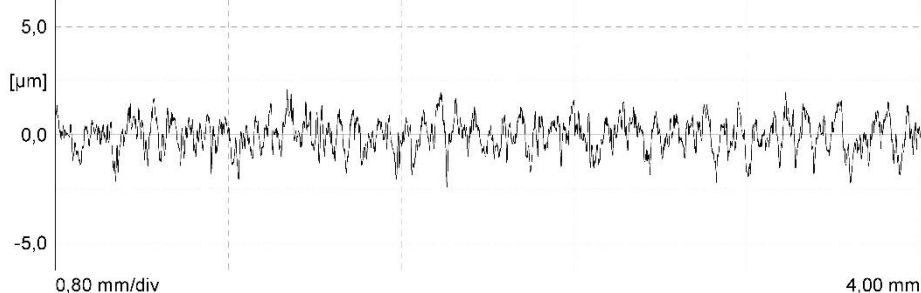
CONDICIONES DE EXPLORACIÓN

LS	2,5	μm
LT	5,60	mm
LM	4,00	mm
Z	5	
VB	$\pm 250,0$	μm

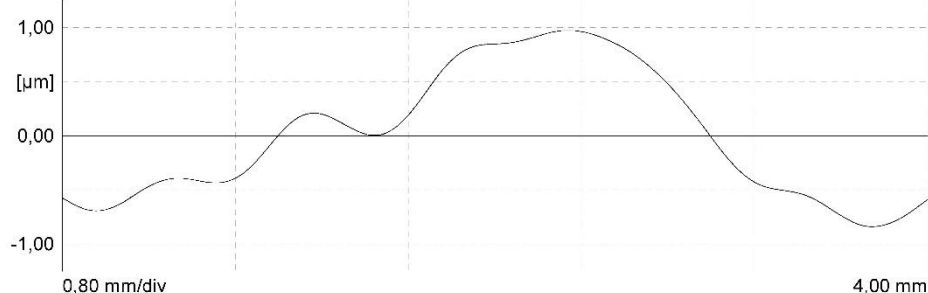
PARÁMETROS DE RUGOSIDAD

Ra	0,59	μm
Rz	4,05	μm
Rq	0,74	μm
Rp	1,84	μm
R Sm	60,18	μm

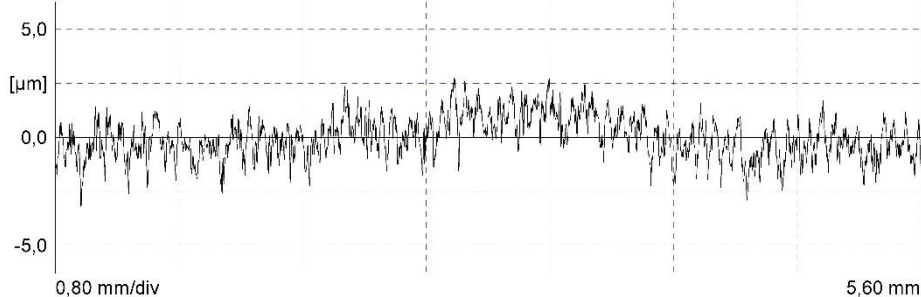
Perfil: R [LC GS 0,80 mm]



Perfil: W [LC GS 0,80 mm]



Perfil: P



ANEXOS



PROBETAS PARA ENSAYO DE RECTIFICADO Ti6Al4V GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



Fecha, hora: 22.03.2000, 18:33
Observación: TiVw460ae40G2
PIEZA: Cilindro Ti6Al4V- $V_w = 460$ r/min

INSPECTOR: Fernando Sánchez Artola
EQUIPO: Mahr PERTHOMETER PGK 120
PALPADOR: MFW-250

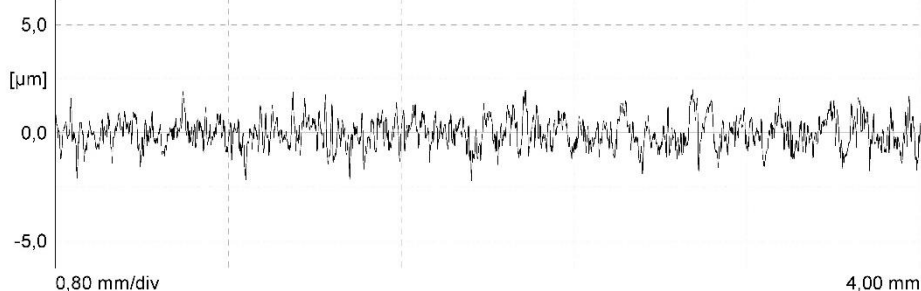
CONDICIONES DE EXPLORACIÓN

LS	2,5	μm
LT	5,60	mm
LM	4,00	mm
Z	5	
VB	$\pm 250,0$	μm

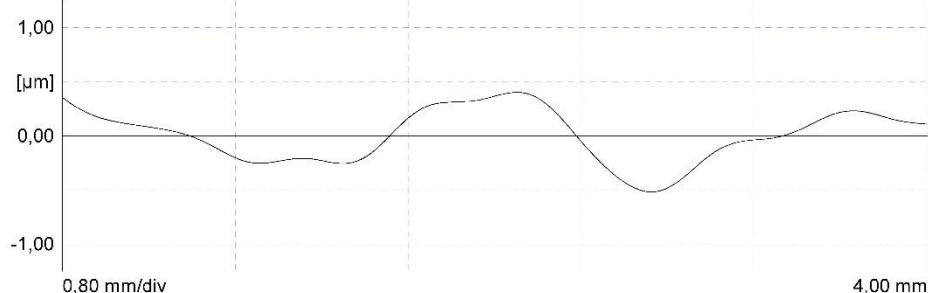
PARÁMETROS DE RUGOSIDAD

Ra	0,53	μm
Rz	3,92	μm
Rq	0,66	μm
Rp	1,89	μm
R Sm	43,97	μm

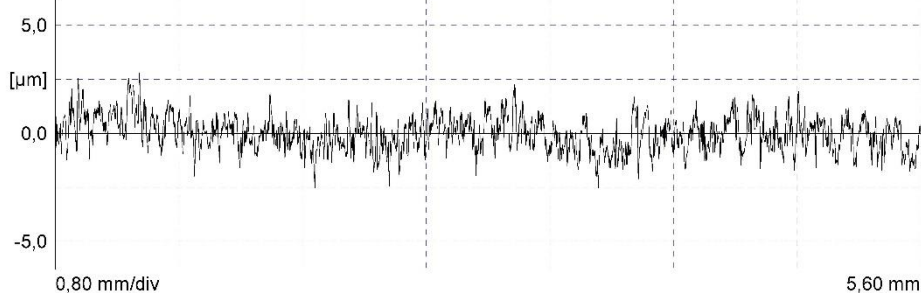
Perfil: R [LC GS 0,80 mm]



Perfil: W [LC GS 0,80 mm]



Perfil: P



ANEXOS



PROBETAS PARA ENSAYO DE RECTIFICADO Ti6Al4V

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



Fecha, hora: 22.03.2000, 18:39
Observación: TiVw460ae40G3
PIEZA: Cilindro Ti6Al4V- $V_w = 460$ r/min

INSPECTOR: Fernando Sánchez Artola
EQUIPO: Mahr PERTHOMETER PGK 120
PALPADOR: MFW-250

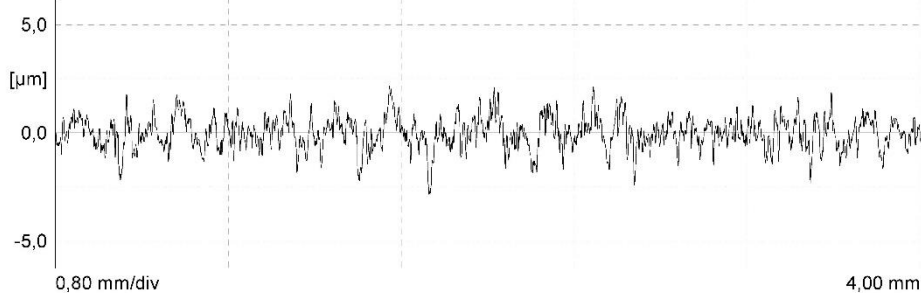
CONDICIONES DE EXPLORACIÓN

LS	2,5	μm
LT	5,60	mm
LM	4,00	mm
Z	5	
VB	$\pm 250,0$	μm

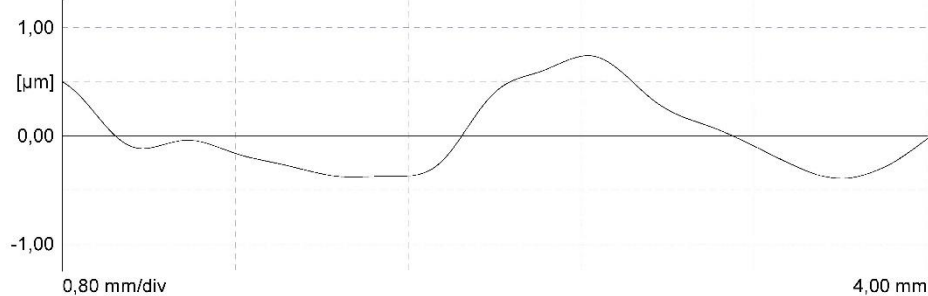
PARÁMETROS DE RUGOSIDAD

Ra	0,57	μm
Rz	4,39	μm
Rq	0,73	μm
Rp	2,00	μm
R Sm	59,97	μm

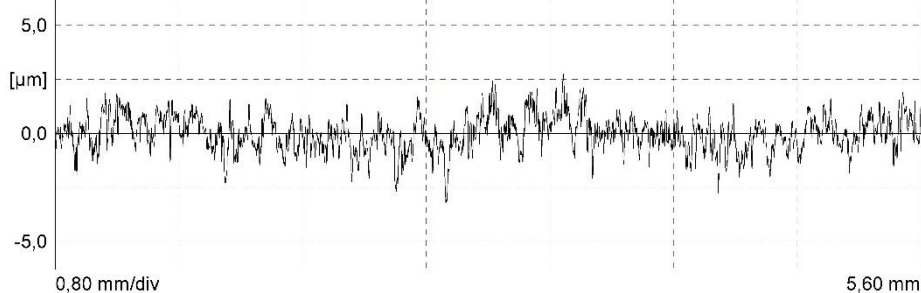
Perfil: R [LC GS 0,80 mm]



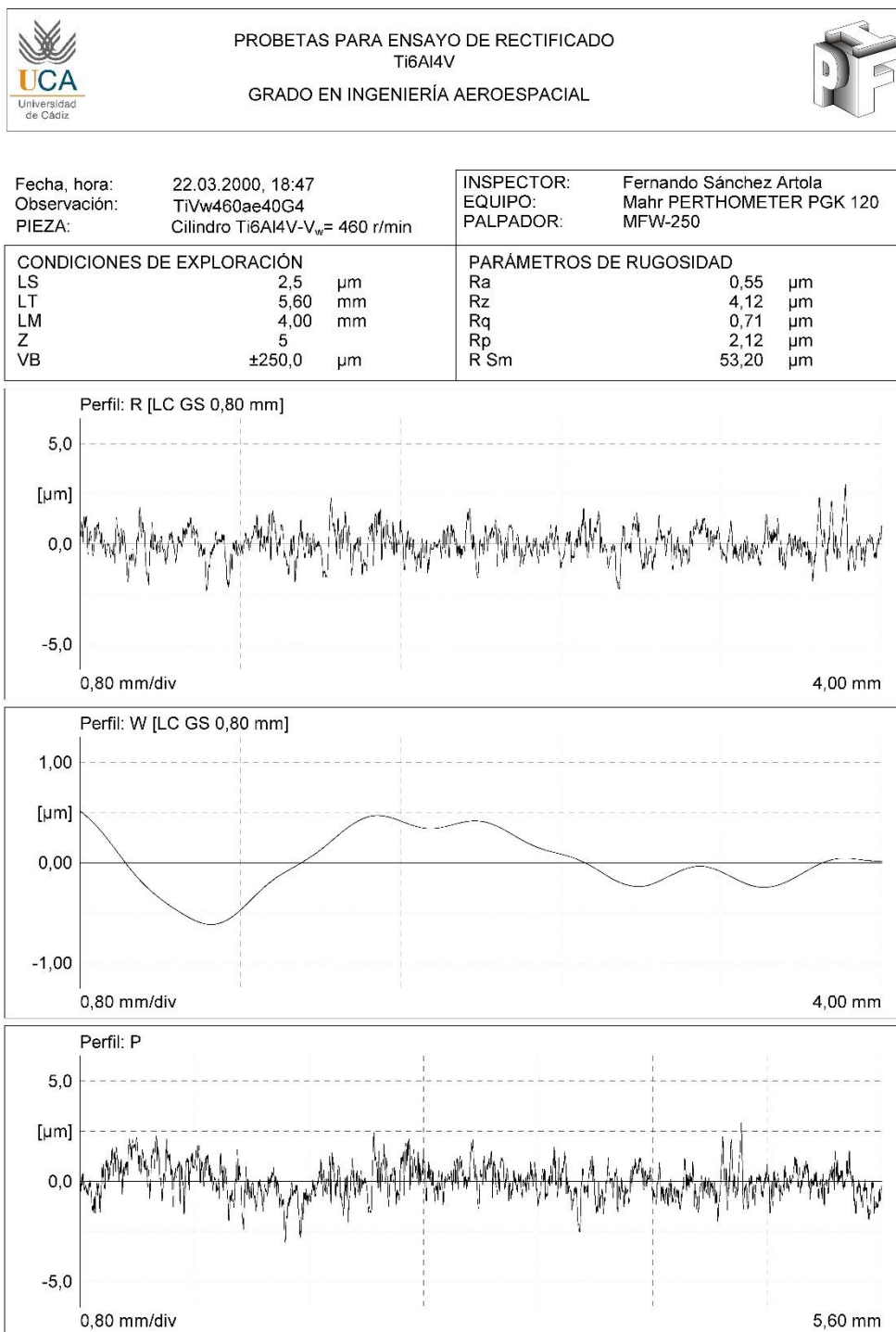
Perfil: W [LC GS 0,80 mm]



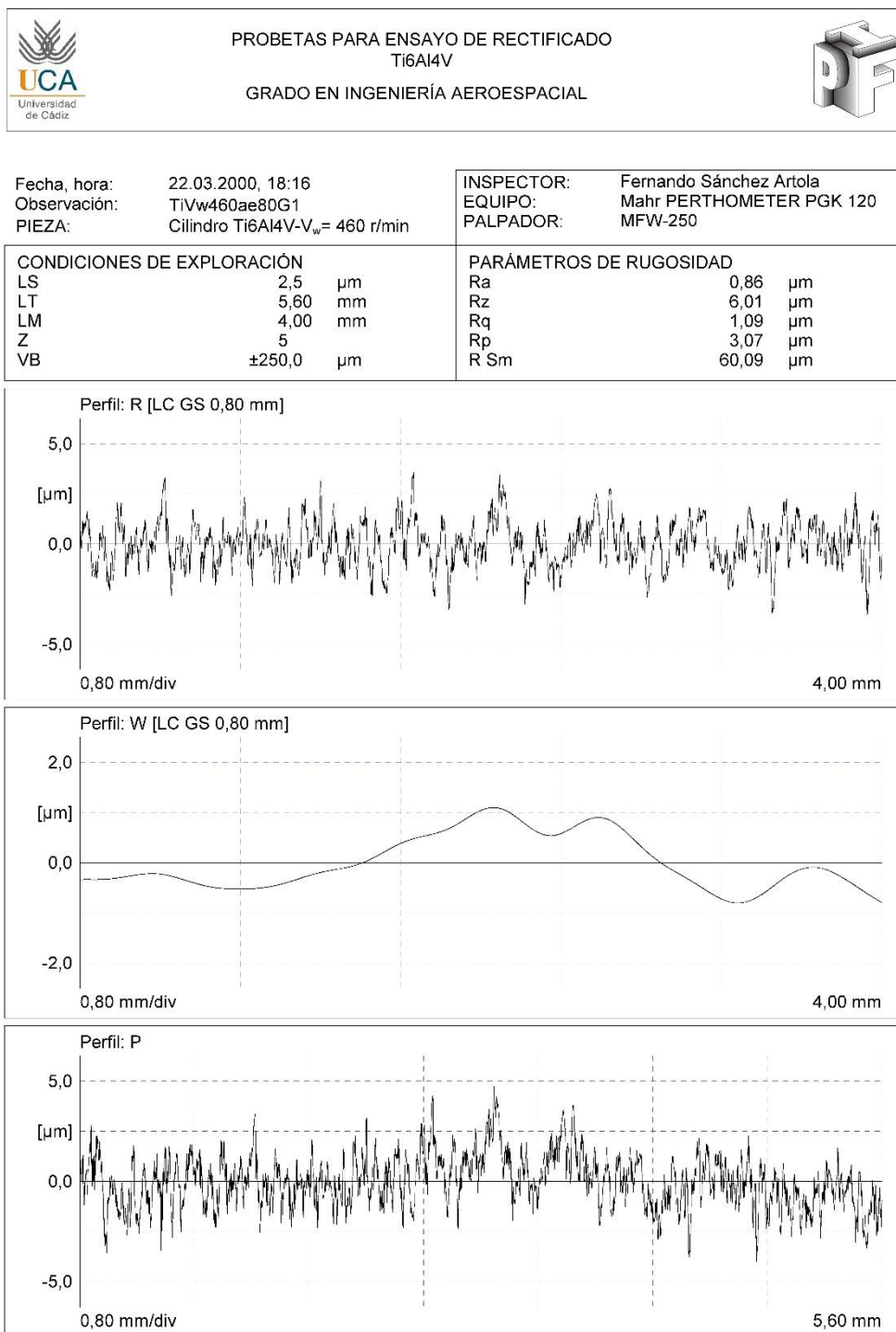
Perfil: P



ANEXOS



ANEXOS



ANEXOS



PROBETAS PARA ENSAYO DE RECTIFICADO Ti6Al4V

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



Fecha, hora: 22.03.2000, 18:35
Observación: TiVw460ae80G2
PIEZA: Cilindro Ti6Al4V- $V_w = 460$ r/min

INSPECTOR: Fernando Sánchez Artola
EQUIPO: Mahr PERTHOMETER PGK 120
PALPADOR: MFW-250

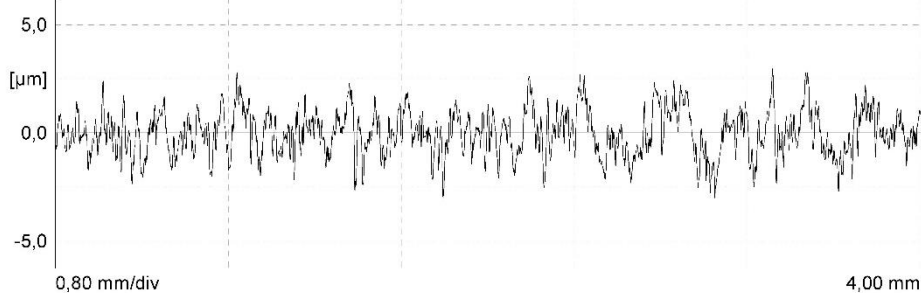
CONDICIONES DE EXPLORACIÓN

LS	2,5	μm
LT	5,60	mm
LM	4,00	mm
Z	5	
VB	$\pm 250,0$	μm

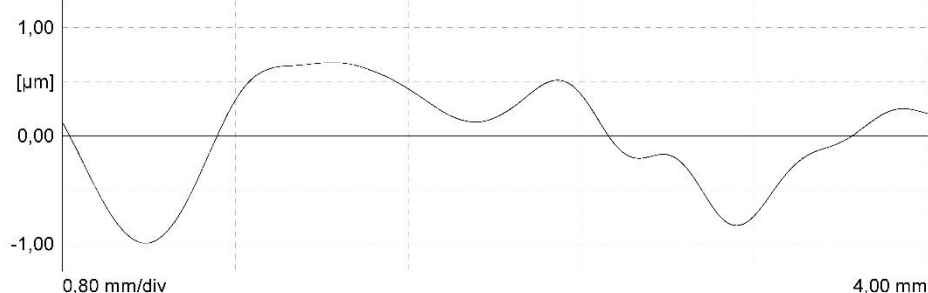
PARÁMETROS DE RUGOSIDAD

Ra	0,82	μm
Rz	5,44	μm
Rq	1,03	μm
Rp	2,69	μm
R Sm	61,13	μm

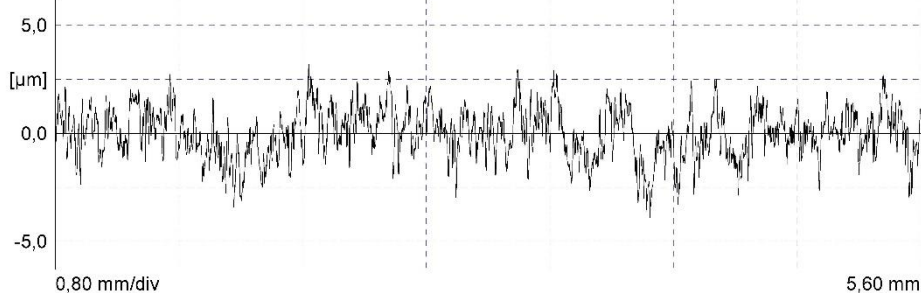
Perfil: R [LC GS 0,80 mm]



Perfil: W [LC GS 0,80 mm]



Perfil: P



ANEXOS



PROBETAS PARA ENSAYO DE RECTIFICADO
Ti6Al4V

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



Fecha, hora: 22.03.2000, 18:41
Observación: TiVw460ae80G3
PIEZA: Cilindro Ti6Al4V- $V_w = 460$ r/min

INSPECTOR: Fernando Sánchez Artola
EQUIPO: Mahr PERTHOMETER PGK 120
PALPADOR: MFW-250

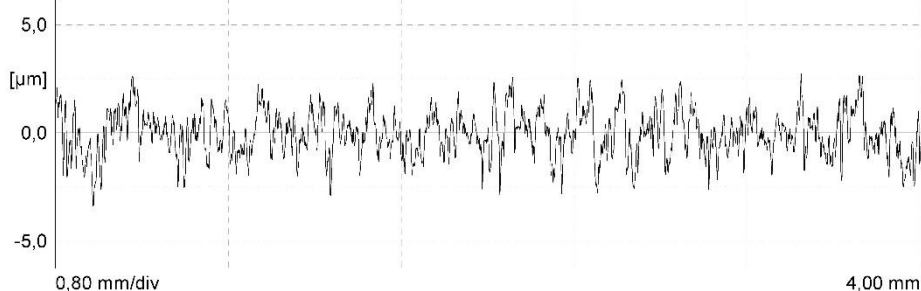
CONDICIONES DE EXPLORACIÓN

LS	2,5	μm
LT	5,60	mm
LM	4,00	mm
Z	5	
VB	$\pm 250,0$	μm

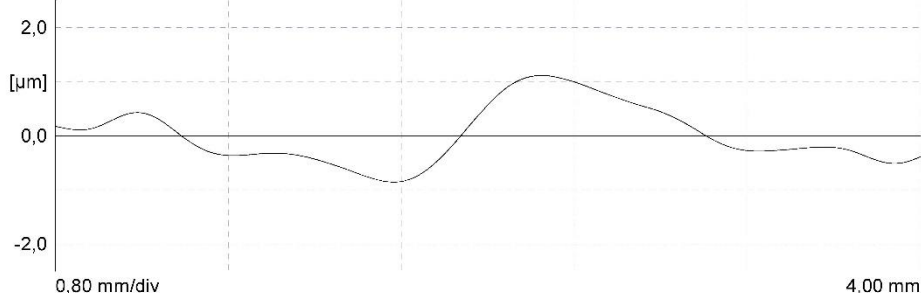
PARÁMETROS DE RUGOSIDAD

Ra	0,82	μm
Rz	5,44	μm
Rq	1,03	μm
Rp	2,55	μm
R Sm	73,01	μm

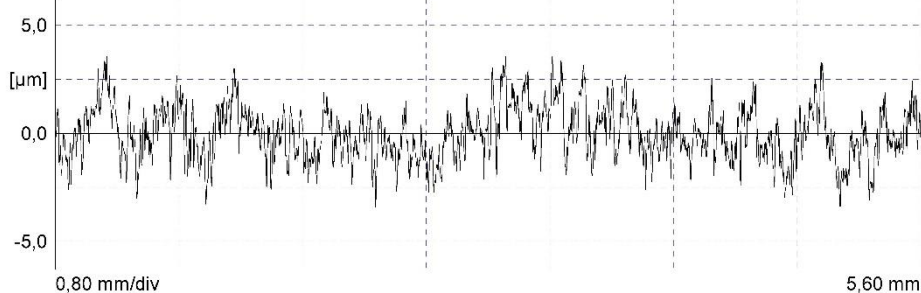
Perfil: R [LC GS 0,80 mm]



Perfil: W [LC GS 0,80 mm]



Perfil: P



ANEXOS



PROBETAS PARA ENSAYO DE RECTIFICADO Ti6Al4V

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



Fecha, hora: 22.03.2000, 18:49
Observación: TiVw460ae80G4
PIEZA: Cilindro Ti6Al4V- $V_w = 460$ r/min

INSPECTOR: Fernando Sánchez Artola
EQUIPO: Mahr PERTHOMETER PGK 120
PALPADOR: MFV-250

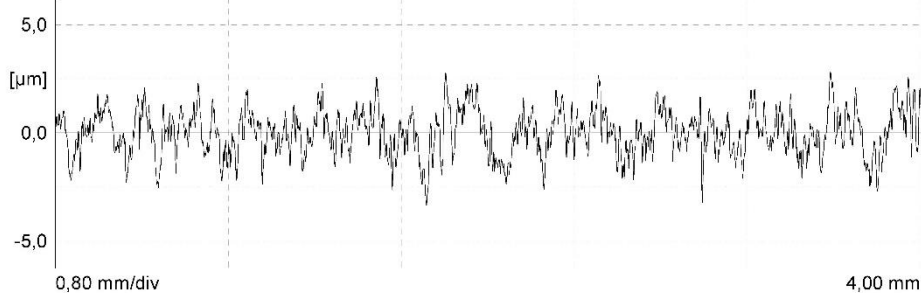
CONDICIONES DE EXPLORACIÓN

LS	2,5	μm
LT	5,60	mm
LM	4,00	mm
Z	5	
VB	$\pm 250,0$	μm

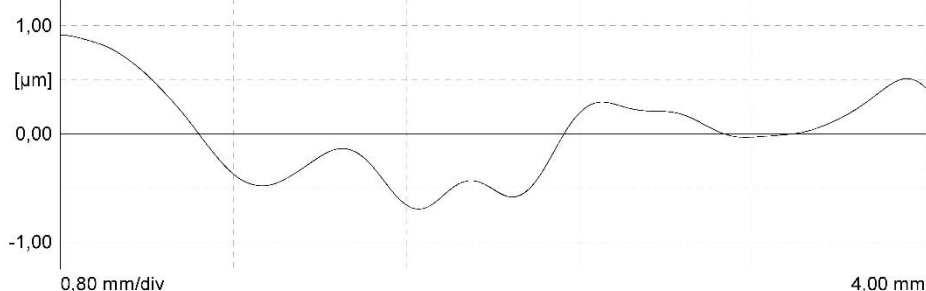
PARÁMETROS DE RUGOSIDAD

Ra	0,82	μm
Rz	5,52	μm
Rq	1,03	μm
Rp	2,63	μm
R Sm	73,82	μm

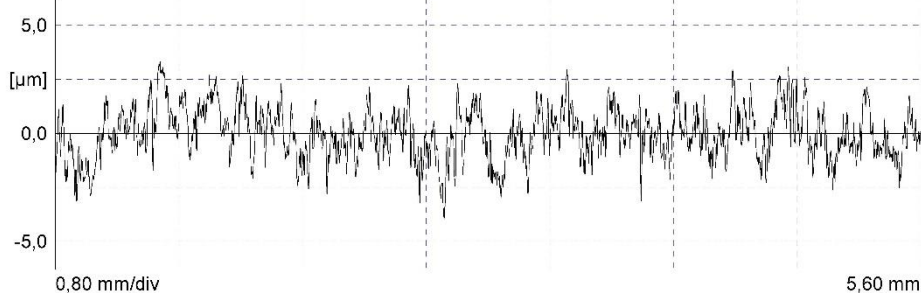
Perfil: R [LC GS 0,80 mm]



Perfil: W [LC GS 0,80 mm]



Perfil: P



ANEXOS

ANEXO VIII

Tabla de mediciones y correspondientes informes de macrogeometría; redondez, cilindridad y rectitud.

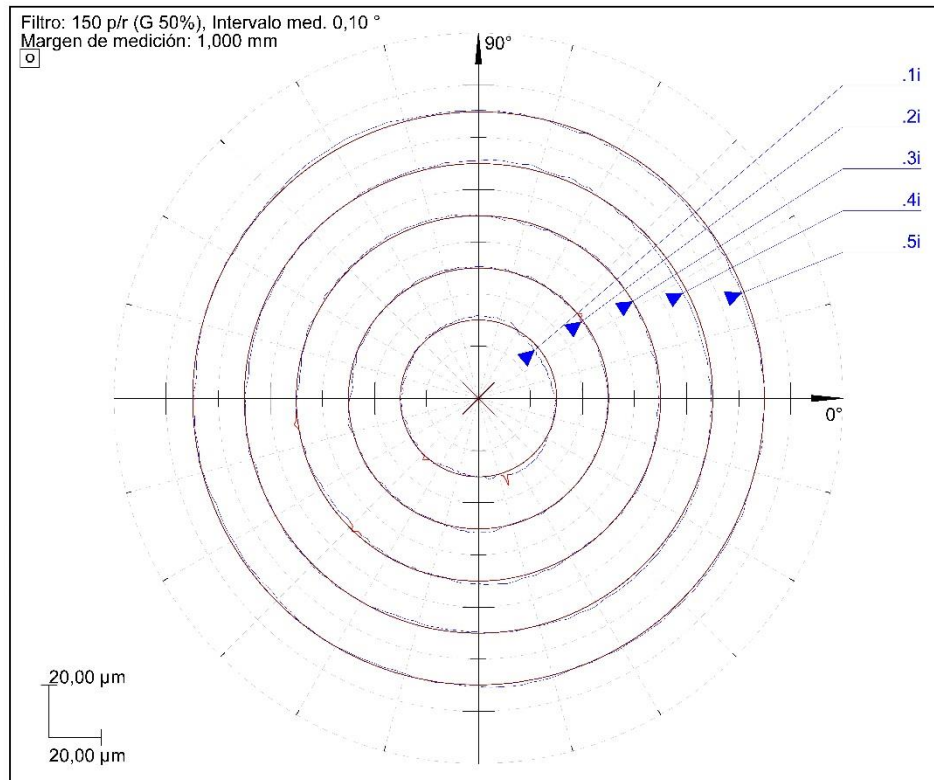
Ensayo	TiVw60ae0	TiVw60ae20	TiVw60ae40	TiVw60ae80	TiVw170ae0	TiVw170ae20	TiVw170ae40	TiVw170ae80
Redondez [μm]	4,61	2,93	1,64	1,73	4,42	10,01	3,52	3,27
	3,04	2,87	1,34	1,18	5,31	8,82	3,58	3,23
	3,7	2,03	1,73	1,3	3,53	7,97	3,35	2,99
	3,5	1,58	2	2,03	4,49	16,35	3,1	2,74
	3,48	1,99	1,77	1,37	3,74	18,43	2,43	2,5
Cilindridad [μm]	17,45	35,54	34,86	36,57	22,56	41,08	26,2	26,23
Rectitud [μm]	8,41	15,15	13,37	15,59	7,81	16,94	7,98	11,73
	7,27	14,74	14,56	14,42	8,56	16,59	2,68	14,41
	6,05	14,38	15,14	13,42	10,5	15,95	9,91	14,74
	6,53	12,16	14,65	13,95	10,43	11,19	20,87	11,58
	7,87	15,34	13,53	15,18	9,55	12,22	20,62	10,19

ANEXOS

Ensayo	TiVw230ae0	TiVw230ae20	TiVw230ae40	TiVw230ae80	TiVw460ae0	TiVw460ae20	TiVw460ae40	TiVw460ae80
Redondez [μm]	3,88	6,9	1,3	1,06	8,3	17,13	2,76	1,92
	3,36	5,12	1,36	1,36	7,66	17,85	2,67	3,06
	3,3	5,96	1,43	1,29	7,18	21,05	2,96	2,84
	3,25	8,42	1,55	4,76	6,13	24,26	2,32	2,48
	4,21	10,15	2,27	2,26	6,37	26,94	2,47	7,61
Cilindricidad [μm]	27,58	40,91	27,5	26,38	43,93	58,19	33,61	34,05
Rectitud [μm]	7,91	12,3	15,47	12,04	16,26	2,31	15,12	20,35
	9,08	15,09	14,62	12,74	16,77	13,29	20,01	14,9
	14,95	16,04	13,17	14,73	20,56	24,67	19,91	12,75
	16,61	15,37	12,94	15,55	23,4	38,87	14,84	16,72
	12,21	16,91	14,38	13,75	20,34	19,41	11,43	21,5

ANEXOS

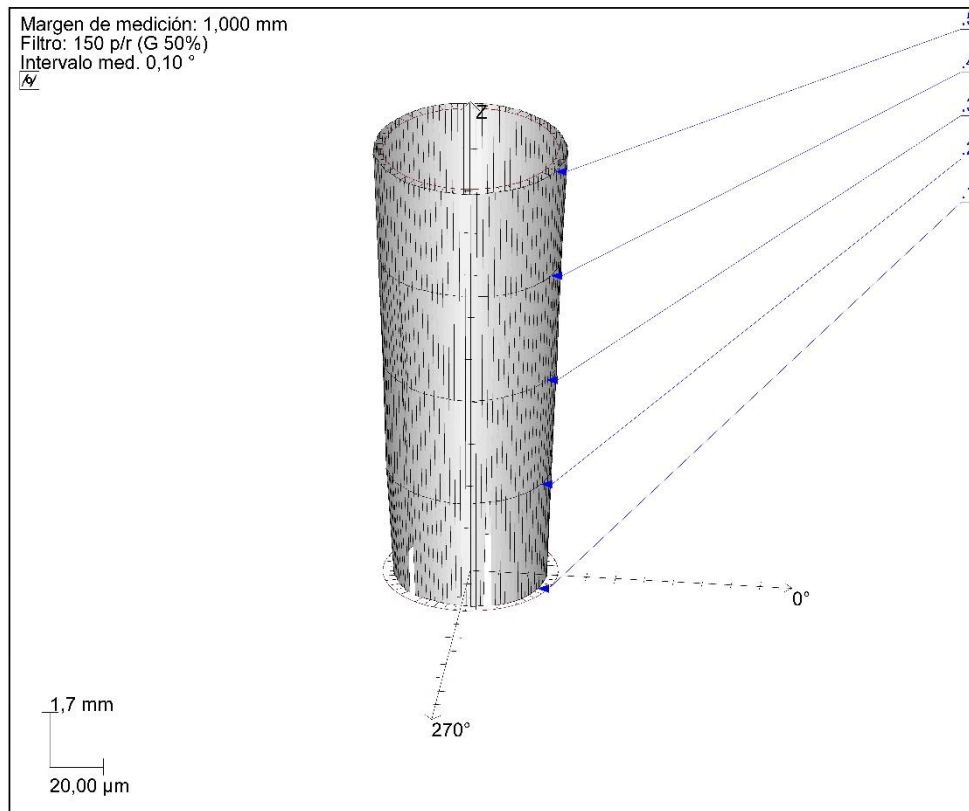
	FORM-PC		PROBETAS PARA ENSAYOS DE RECTIFICADO Ti6Al4V	31.05.2017	
	V4.28.7 SP5		GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL	18:24:04	
	Pieza Ti6Al4V		Nº de plano -	Operación TiVw60ae0	Verificador M-14
	Protocolo de medición: 418		Centro de comprobación:		Firma
	Probadora de formas: MMQ 44 CNC		Nº orden: -	Nº de lote: 0	
Comentario -					



Perfil o Operación	Posición [mm, °]	Resultado [µm] Ø-[mm]	Tolerancia [mm]	Ref.	Referencia	Excentricidad [µm]	Fas [°] Inc [µm/m]
.1	74,91	4,61		LSC		1,84	115,70
.2	79,16	3,04		LSC		1,72	93,47
.3	83,41	3,70		LSC		1,34	136,41
.4	87,66	3,50		LSC		1,13	159,20
.5	91,91	3,48		LSC		1,14	183,50
/2		4,61	0,0000	LSC			


ANEXOS

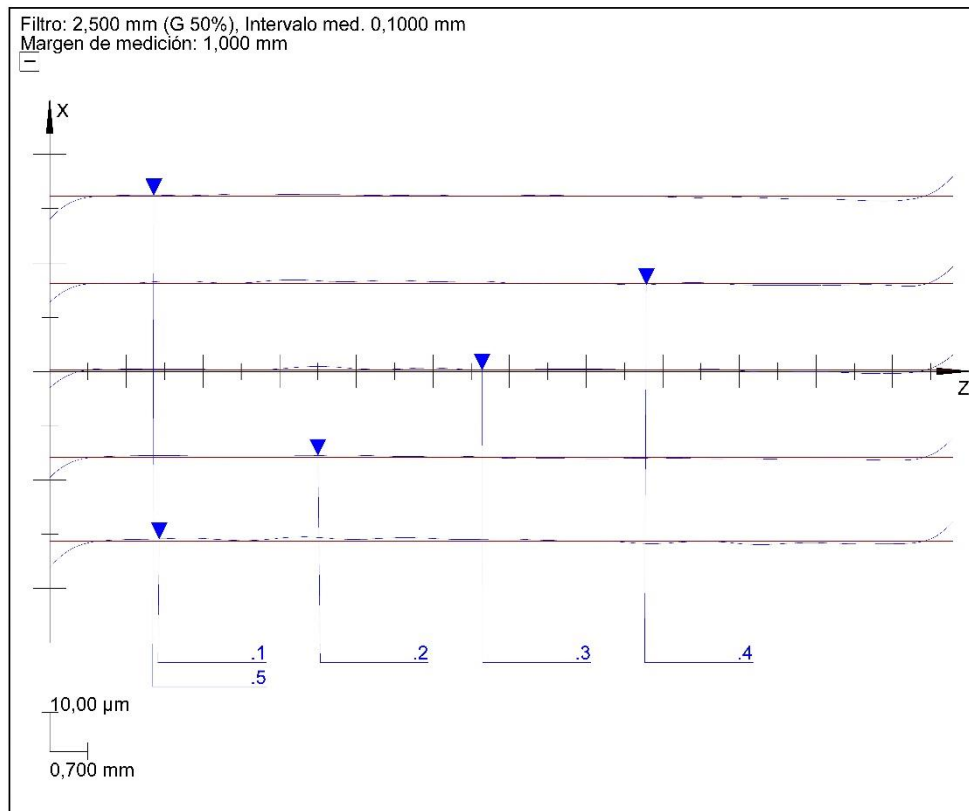
Mahr	FORM-PC		PROBETAS PARA ENSAYOS DE RECTIFICADO Ti6Al4V	31.05.2017
	V4.28.7 SP5		GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL	18:24:04
Pieza Ti6Al4V	Nº de plano -	Operación TiVw60ae0		Verificador M-14
Protocolo de medición: 418		Centro de comprobación:		Firma
Probadora de formas: MMQ 44 CNC		Nº orden: -		Nº de lote: 0
Comentario -				



Perfil o Operación	Posición [mm, °]	Resultado [µm] \varnothing :[mm]	Tolerancia [mm]	Ref.	Referencia	Excentricidad [µm]	Fas [°] Inc [µm/m]
I/2		\varnothing 17,45	0,0000	LSC			

ANEXOS

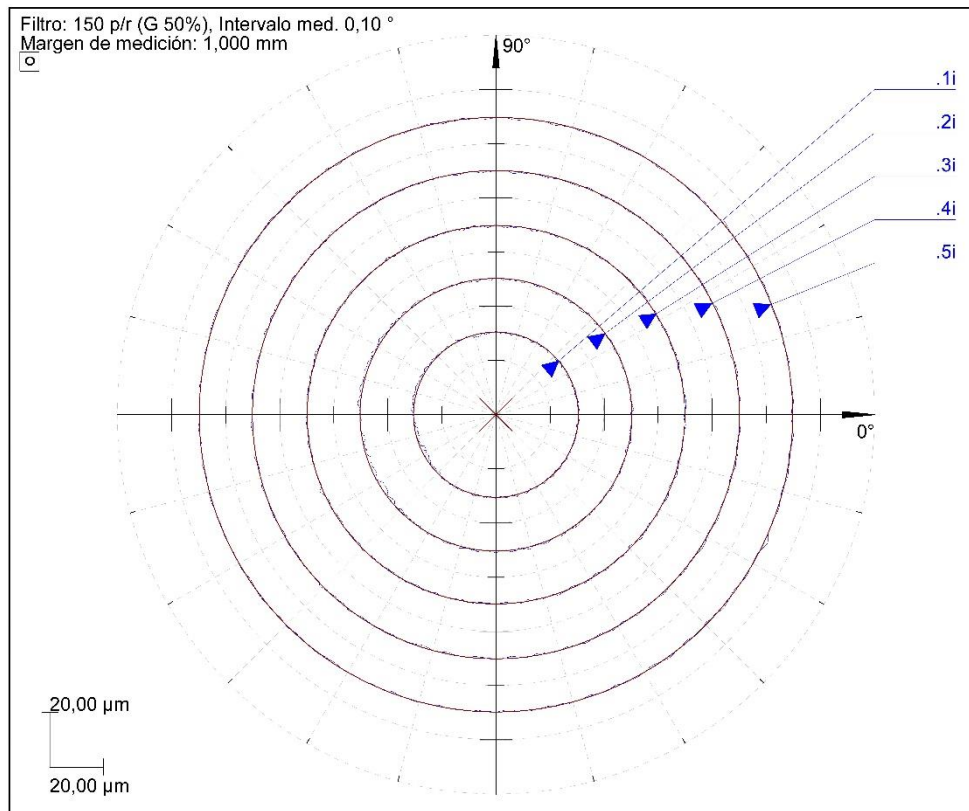
Mahr	FORM-PC		PROBETAS PARA ENSAYOS DE RECTIFICADO Ti6Al4V	31.05.2017	
	V4.28.7 SP5		GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL	18:21:09	
	Pieza Ti6Al4V		Nº de plano -	Operación TiVw60ae0	Verificador M-14
	Protocolo de medición: 418		Centro de comprobación:		Firma
	Probadora de formas: MMQ 44 CNC		Nº orden: -	Nº de lote: 0	
Comentario -					



Perfil o Operación	Posición [mm, °]	Resultado [µm] σ [mm]	Tolerancia [mm]	Ref.	Referencia	Excentricidad [µm]	Fas [°] Inc [µm/m]
.1	75,3	8,41		LSS			-865
.2	147,3	7,27		LSS			-764
.3	219,2	6,05		LSS			-637
.4	291,2	6,53		LSS			-694
.5	3,1	7,87		LSS			-814
/2		8,41	0,1000	LSS			

ANEXOS

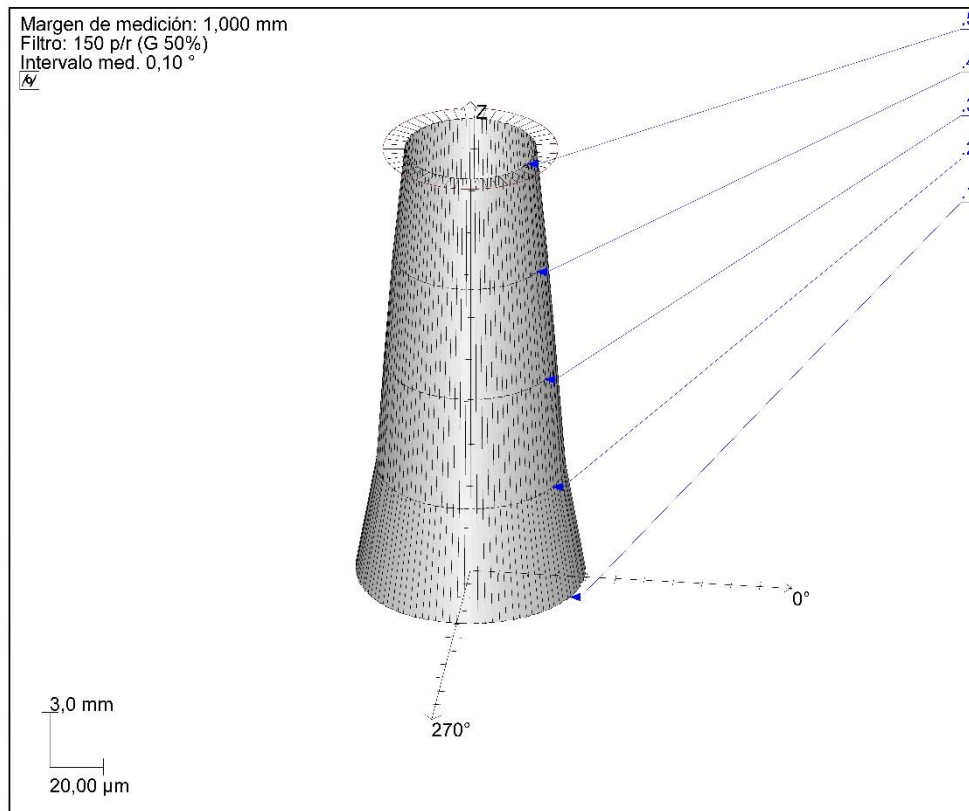
Mahr	FORM-PC		PROBETAS PARA ENSAYOS DE RECTIFICADO Ti6Al4V	31.05.2017
	V4.28.7 SP5		GRADO EN INGENIERÍA AEROSPAECIAL	18:44:36
Pieza Ti6Al4V	Nº de plano -		Operación TiVw60ae20	Verificador M-14
Protocolo de medición: 418		Centro de comprobación:		Firma
Probadora de formas: MMQ 44 CNC		Nº orden: -		Nº de lote: 0
Comentario -				



Perfil o Operación	Posición [mm, °]	Resultado [µm] Ø-[mm]	Tolerancia [mm]	Ref.	Referencia	Excentricidad [µm]	Fas [°] Inc [µm/m]
.1	184,62	2,93		LSC		19,99	113,78
.2	192,12	2,87		LSC		19,87	113,49
.3	199,62	2,03		LSC		19,64	112,15
.4	207,12	1,58		LSC		19,11	111,25
.5	214,62	1,99		LSC		19,24	111,07
/5		2,93	0,0000	LSC			

ANEXOS

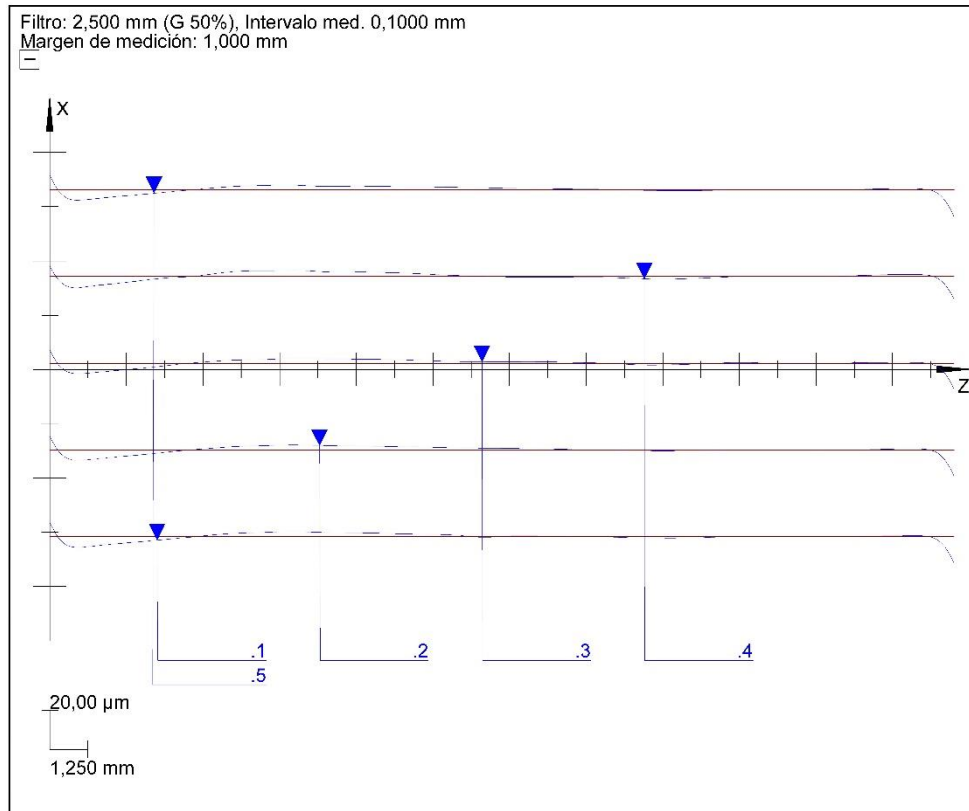
Mahr	FORM-PC		PROBETAS PARA ENSAYOS DE RECTIFICADO Ti6Al4V	31.05.2017	
	V4.28.7 SP5		GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL	18:44:37	
	Pieza Ti6Al4V		Nº de plano -	Operación TiVw60ae20	Verificador M-14
	Protocolo de medición: 418		Centro de comprobación:		Firma
	Probadora de formas: MMQ 44 CNC		Nº orden: -	Nº de lote: 0	
Comentario -					



Perfil o Operación	Posición [mm, °]	Resultado [µm] $\overline{\sigma}$ [mm]	Tolerancia [mm]	Ref.	Referencia	Excentricidad [µm]	Fas [°] Inc [µm/m]
/5		$\overline{\sigma}$ 35,54	0,0000	LSC			


ANEXOS

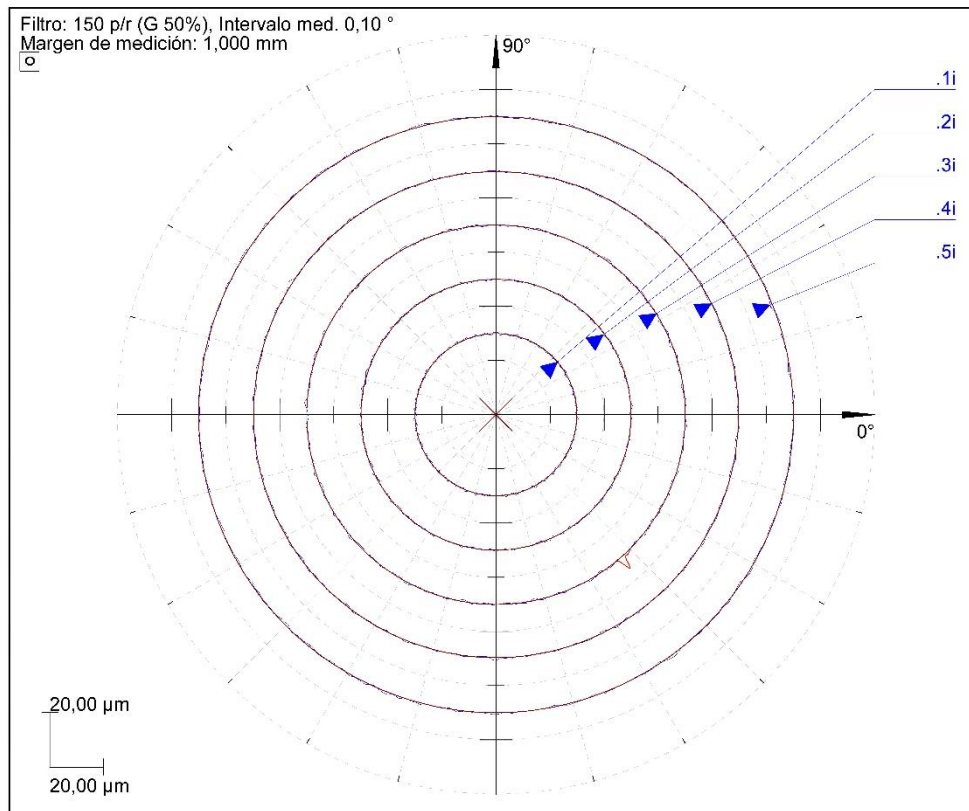
Mahr		FORM-PC V4.28.7 SP5	LCA Laboratorio de Calidad	PROBETAS PARA ENSAYOS DE RECTIFICADO Ti6Al4V GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL	31.05.2017 18:40:59 Verificador M-14 Firma
Pieza Ti6Al4V	Nº de plano -	Operación TiVw60ae20			
Protocolo de medición: 418		Centro de comprobación:			
Probadora de formas: MMQ 44 CNC		Nº orden: -		Nº de lote: 0	
Comentario -					



Perfil o Operación	Posición [mm, °]	Resultado [µm] \overline{x} :[mm]	Tolerancia [mm]	Ref.	Referencia	Excentricidad [µm]	Fas [°] Inc [µm/m]
.1	355,3	15,15		LSS			970
.2	67,2	14,74		LSS			946
.3	139,2	14,38		LSS			921
.4	211,1	12,16		LSS			819
.5	283,1	15,34		LSS			978
/5		15,34	0,1000	LSS			

ANEXOS

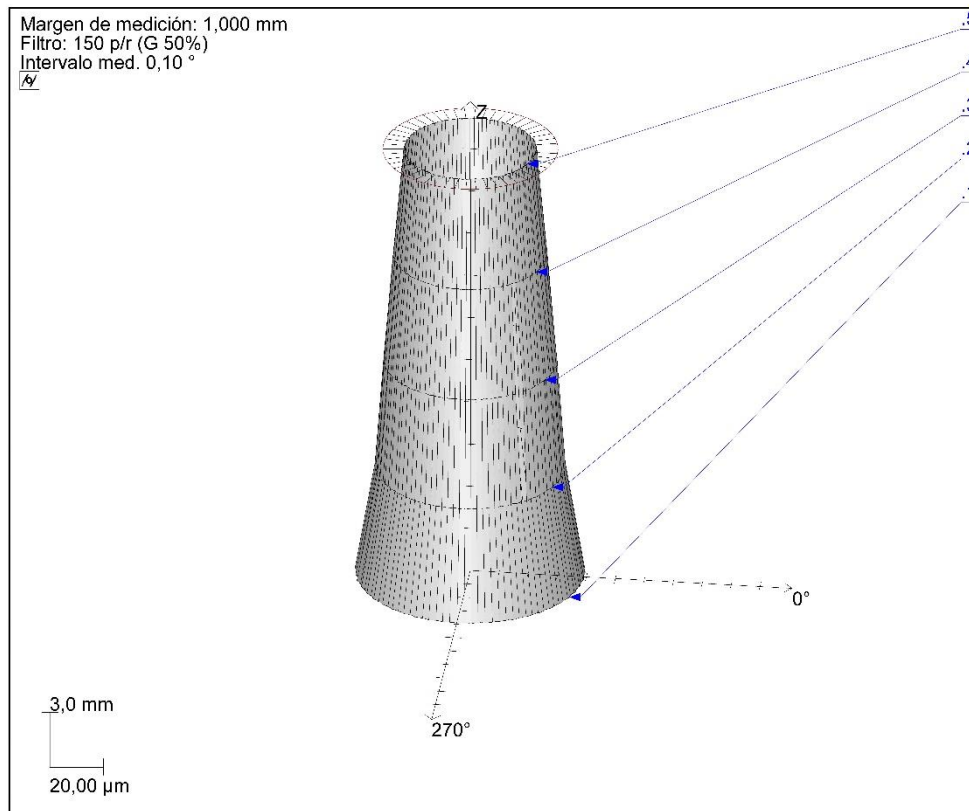
Mahr	FORM-PC		PROBETAS PARA ENSAYOS DE RECTIFICADO Ti6Al4V	31.05.2017
	V4.28.7 SP5		GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL	18:37:43
Pieza Ti6Al4V	Nº de plano -		Operación TiVw60ae40	Verificador M-14
Protocolo de medición: 418		Centro de comprobación:		Firma
Probadora de formas: MMQ 44 CNC		Nº orden: -		Nº de lote: 0
Comentario -				



Perfil o Operación	Posición [mm, °]	Resultado [µm] Ø-[mm]	Tolerancia [mm]	Ref.	Referencia	Excentricidad [µm]	Fas [°] Inc [µm/m]
.1	142,98	1,64	0,0000	LSC		21,62	112,56
.2	150,48	1,34		LSC		21,30	112,34
.3	157,97	1,73		LSC		20,88	112,11
.4	165,47	2,00		LSC		20,18	111,58
.5	172,97	1,77		LSC		19,91	111,26
/4		2,00		LSC			


ANEXOS

Mahr	FORM-PC		PROBETAS PARA ENSAYOS DE RECTIFICADO Ti6Al4V	31.05.2017
	V4.28.7 SP5		GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL	18:37:43
Pieza Ti6Al4V	Nº de plano -	Operación TiVw60ae40		Verificador M-14
Protocolo de medición: 418		Centro de comprobación:		Firma
Probadora de formas: MMQ 44 CNC		Nº orden: -		Nº de lote: 0
Comentario -				

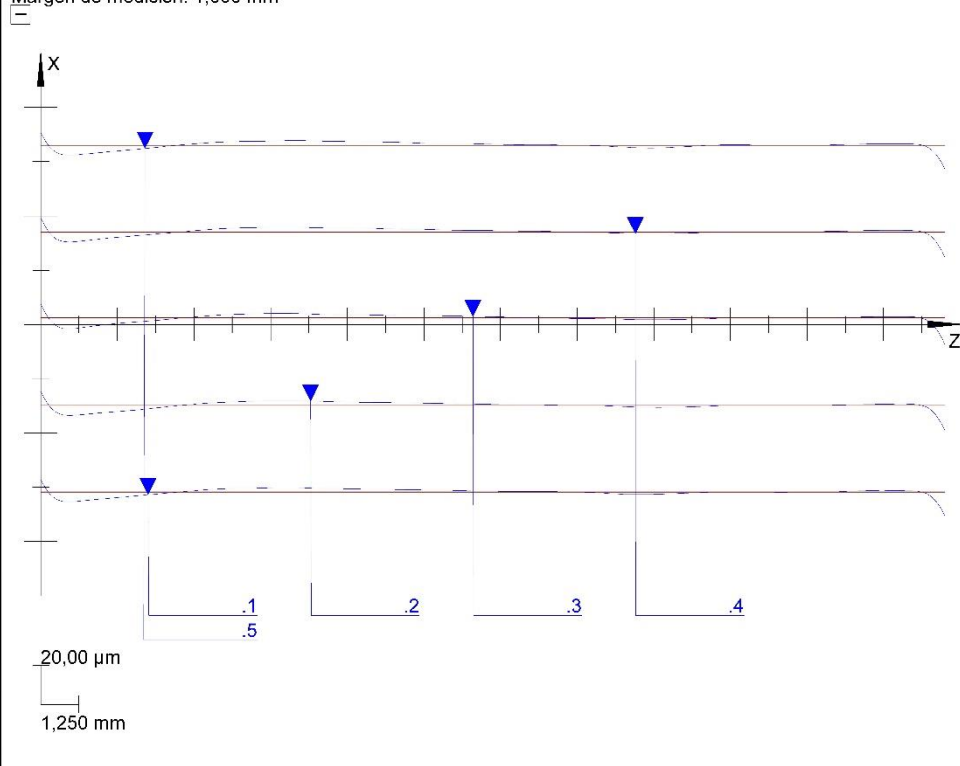


Perfil o Operación	Posición [mm, °]	Resultado [µm] \varnothing [mm]	Tolerancia [mm]	Ref.	Referencia	Excentricidad [µm]	Fas [°] Inc [µm/m]
<i>/4</i>		<i>/4</i> 34,86	0,0000	LSC			

ANEXOS

Mahr		FORM-PC V4.28.7 SP5	 UNIVERSIDAD de Cádiz	PROBETAS PARA ENSAYOS DE RECTIFICADO Ti6Al4V GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL	31.05.2017 18:34:18 Verificador M-14 Firma
Pieza Ti6Al4V	Nº de plano -	Operación TiVw60ae40			
Protocolo de medición: 418		Centro de comprobación:			
Probadora de formas: MMQ 44 CNC		Nº orden: -		Nº de lote: 0	
Comentario -					

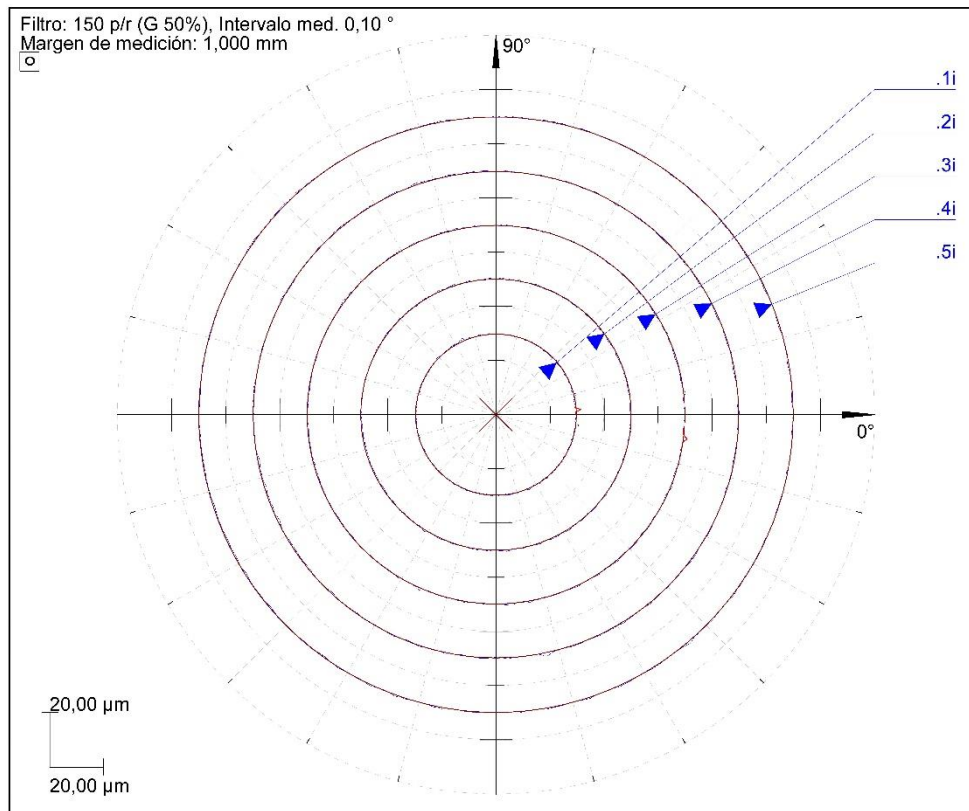
Filtro: 2,500 mm (G 50%), Intervalo med. 0,1000 mm
Margen de medición: 1,000 mm



Perfil o Operación	Posición [mm, °]	Resultado [µm] σ :[mm]	Tolerancia [mm]	Ref.	Referencia	Excentricidad [µm]	Fas [°] Inc [µm/m]
.1	154,6	13,37		LSS			865
.2	226,5	14,56		LSS			932
.3	298,5	15,14		LSS			974
.4	10,4	14,65		LSS			941
.5	82,4	13,53		LSS			876
/4		15,14	0,1000	LSS			

ANEXOS

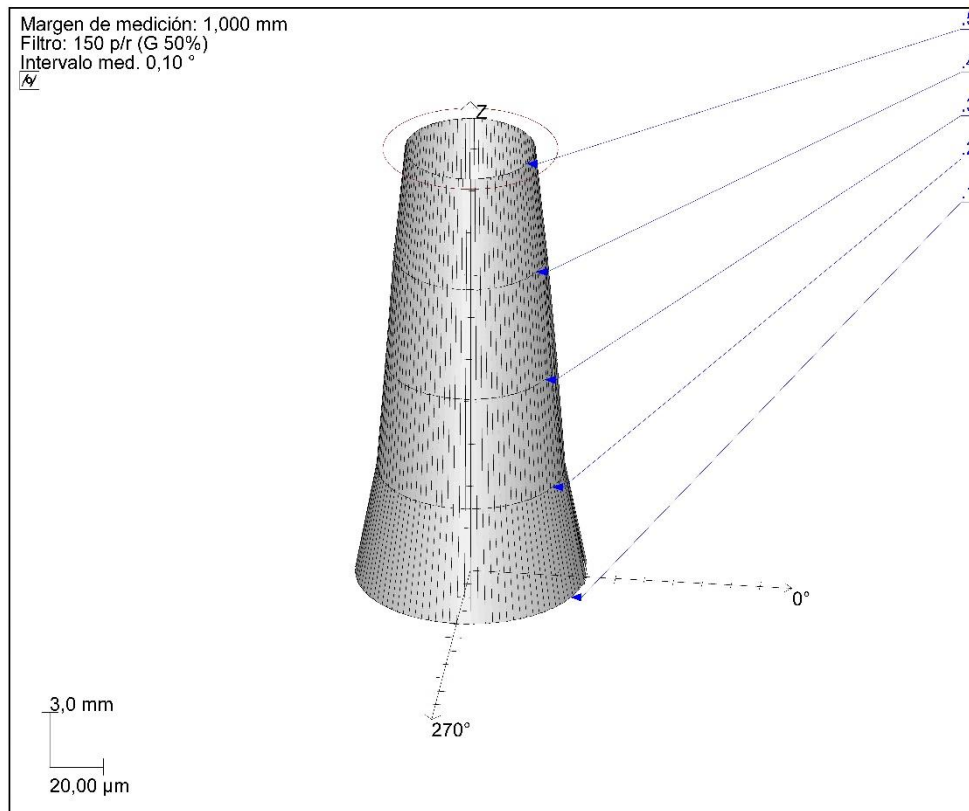
Mahr	FORM-PC		PROBETAS PARA ENSAYOS DE RECTIFICADO Ti6Al4V	31.05.2017
	V4.28.7 SP5		GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL	18:30:25
Pieza Ti6Al4V	Nº de plano -		Operación TiVw60ae80	Verificador M-14
Protocolo de medición: 418		Centro de comprobación:		Firma
Probadora de formas: MMQ 44 CNC		Nº orden: -		Nº de lote: 0
Comentario -				



Perfil o Operación	Posición [mm, °]	Resultado [µm] Ø-[mm]	Tolerancia [mm]	Ref.	Referencia	Excentricidad [µm]	Fas [°] Inc [µm/m]
.1	98,94	Ø 1,73		LSC		22,31	109,56
.2	106,44	Ø 1,18		LSC		21,75	109,86
.3	113,94	Ø 1,30		LSC		21,45	110,04
.4	121,44	Ø 2,03		LSC		20,80	109,51
.5	128,94	Ø 1,37		LSC		20,46	109,38
/3		Ø 2,03	0,0000	LSC			

ANEXOS

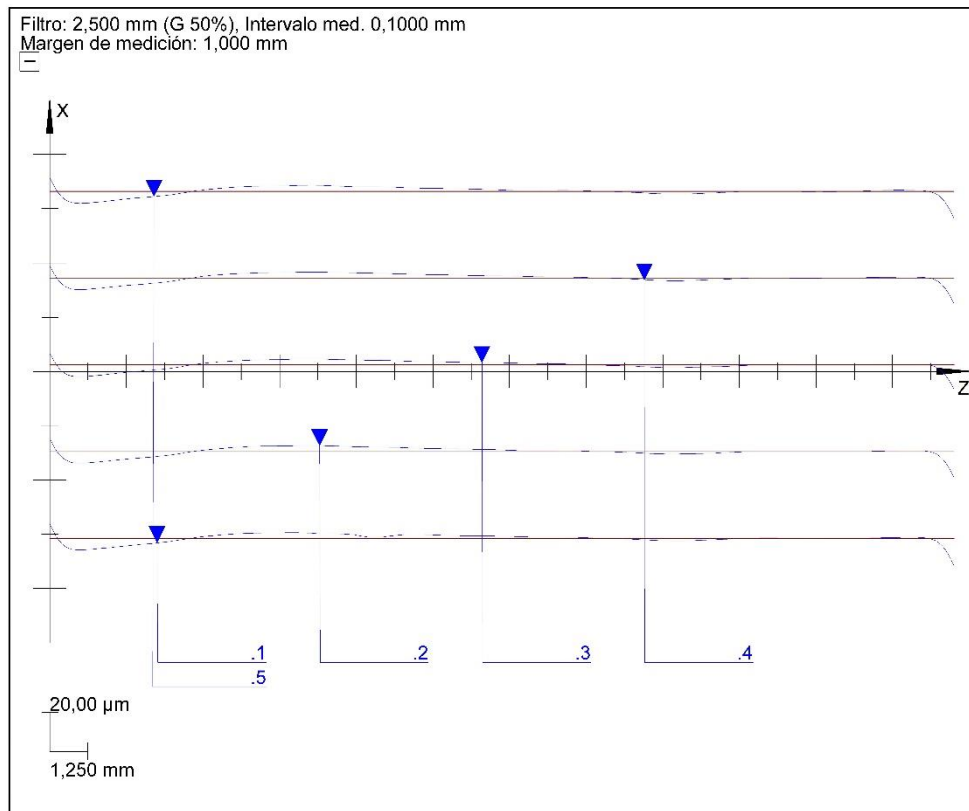
Mahr	FORM-PC		PROBETAS PARA ENSAYOS DE RECTIFICADO Ti6Al4V	31.05.2017
	V4.28.7 SP5		GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL	18:30:25
Pieza Ti6Al4V	Nº de plano -	Operación TiVw60ae80		Verificador M-14
Protocolo de medición: 418		Centro de comprobación:		Firma
Probadora de formas: MMQ 44 CNC		Nº orden: -		Nº de lote: 0
Comentario -				



Perfil o Operación	Posición [mm, °]	Resultado [µm] $\sqrt{\lambda}$ [mm]	Tolerancia [mm]	Ref.	Referencia	Excentricidad [µm]	Fas [°] Inc [µm/m]
/3		$\sqrt{\lambda}$ 36,57	0,0000	LSC			

ANEXOS

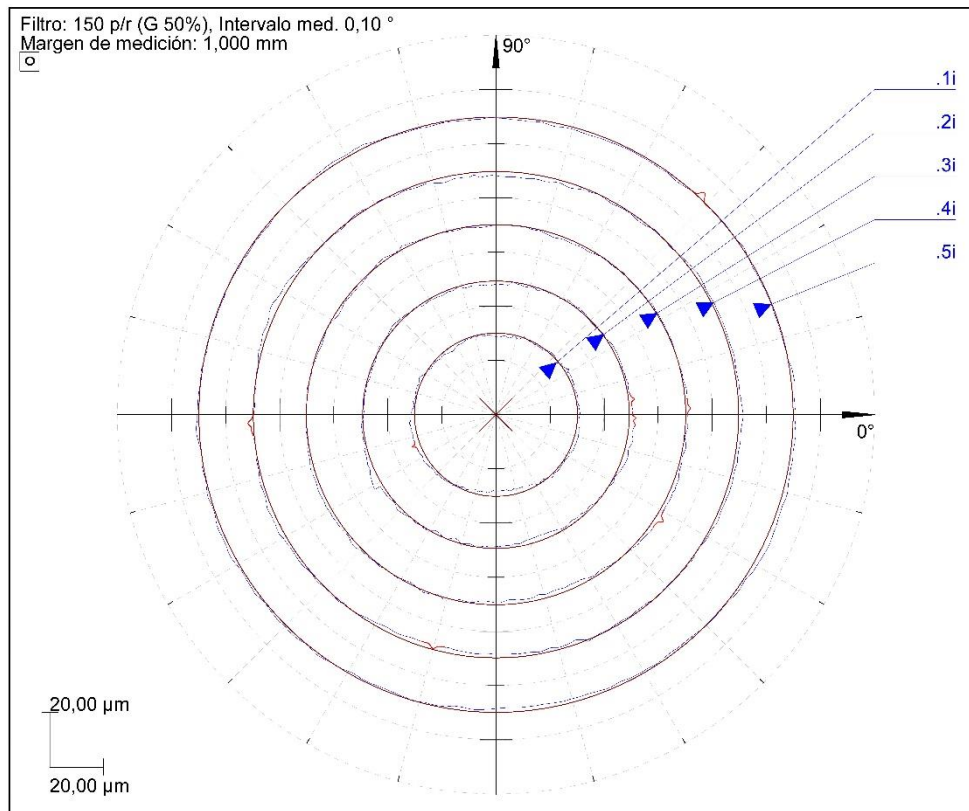
Mahr	FORM-PC	LCA Laboratorio de Calidad	PROBETAS PARA ENSAYOS DE RECTIFICADO Ti6Al4V	31.05.2017
	V4.28.7 SP5		GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL	18:27:00
Pieza Ti6Al4V	Nº de plano -	Operación TiVw60ae80	Verificador M-14	Firma
Protocolo de medición: 418		Centro de comprobación:		
Probadora de formas: MMQ 44 CNC		Nº orden: -	Nº de lote: 0	
Comentario -				



Perfil o Operación	Posición [mm, °]	Resultado [µm] σ [mm]	Tolerancia [mm]	Ref.	Referencia	Excentricidad [µm]	Fas [°] Inc [µm/m]
.1	313,9	15,59		LSS			1000
.2	25,9	14,42		LSS			933
.3	97,8	13,42		LSS			877
.4	169,8	13,95		LSS			907
.5	241,7	15,18		LSS			976
/3		15,59	0,1000	LSS			

ANEXOS

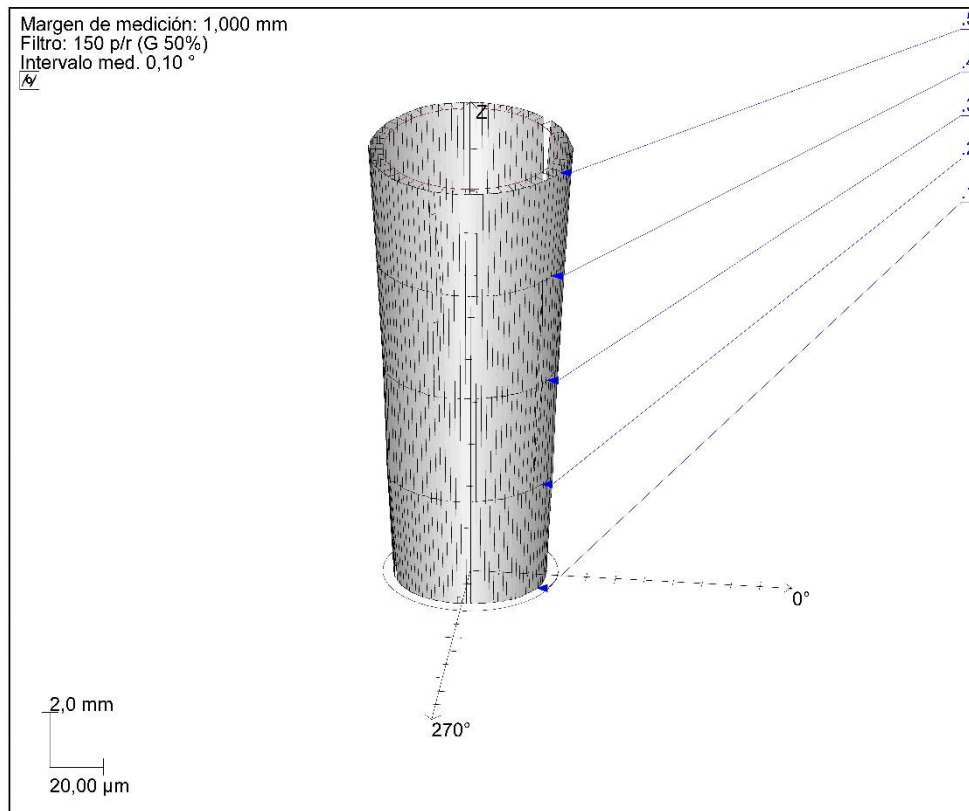
Mahr	FORM-PC		PROBETAS PARA ENSAYOS DE RECTIFICADO Ti6Al4V	31.05.2017
	V4.28.7 SP5		GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL	15:13:27
Pieza Ti6Al4V	Nº de plano -		Operación TiVw170ae0	Verificador M-14
Protocolo de medición: 418		Centro de comprobación:		Firma
Probadora de formas: MMQ 44 CNC		Nº orden: -		Nº de lote: 0
Comentario -				



Perfil o Operación	Posición [mm, °]	Resultado [µm] Ø-[mm]	Tolerancia [mm]	Ref.	Referencia	Excentricidad [µm]	Fas [°] Inc [µm/m]
.1	72,53	4,42	0,0000	LSC		2,44	68,17
.2	77,53	5,31		LSC		2,51	62,66
.3	82,53	3,53		LSC		2,42	97,25
.4	87,53	4,49		LSC		2,31	107,62
.5	92,53	3,74		LSC		3,33	122,18
/2		5,31		LSC			

ANEXOS

Mahr		FORM-PC V4.28.7 SP5	 UNIVERSIDAD de CORDOBA	PROBETAS PARA ENSAYOS DE RECTIFICADO Ti6Al4V GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL	31.05.2017 15:13:27 Verificador M-14 Firma
Pieza Ti6Al4V	Nº de plano -	Operación TiVw170ae0			
Protocolo de medición: 418		Centro de comprobación:			
Probadora de formas: MMQ 44 CNC		Nº orden: -		Nº de lote: 0	
Comentario -					

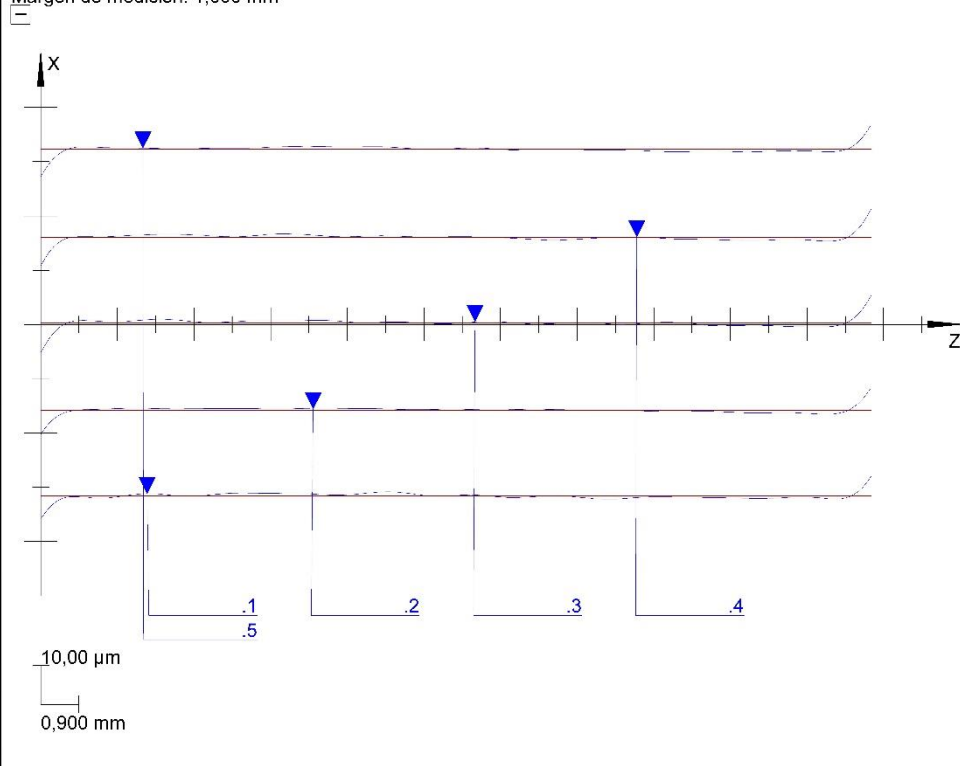


Perfil o Operación	Posición [mm, °]	Resultado [µm] $\overline{\sigma}$ [mm]	Tolerancia [mm]	Ref.	Referencia	Excentricidad [µm]	Fas [°] Inc [µm/m]
I/2		$\overline{\sigma}$ 22,56	0,0000	LSC			

ANEXOS

Mahr	FORM-PC		PROBETAS PARA ENSAYOS DE RECTIFICADO Ti6Al4V	31.05.2017	
	V4.28.7 SP5		GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL	15:07:09	
	Pieza Ti6Al4V		Nº de plano -	Operación TiVw170ae0	Verificador M-14
	Protocolo de medición: 418		Centro de comprobación:		Firma
	Probadora de formas: MMQ 44 CNC		Nº orden: -	Nº de lote: 0	
Comentario -					

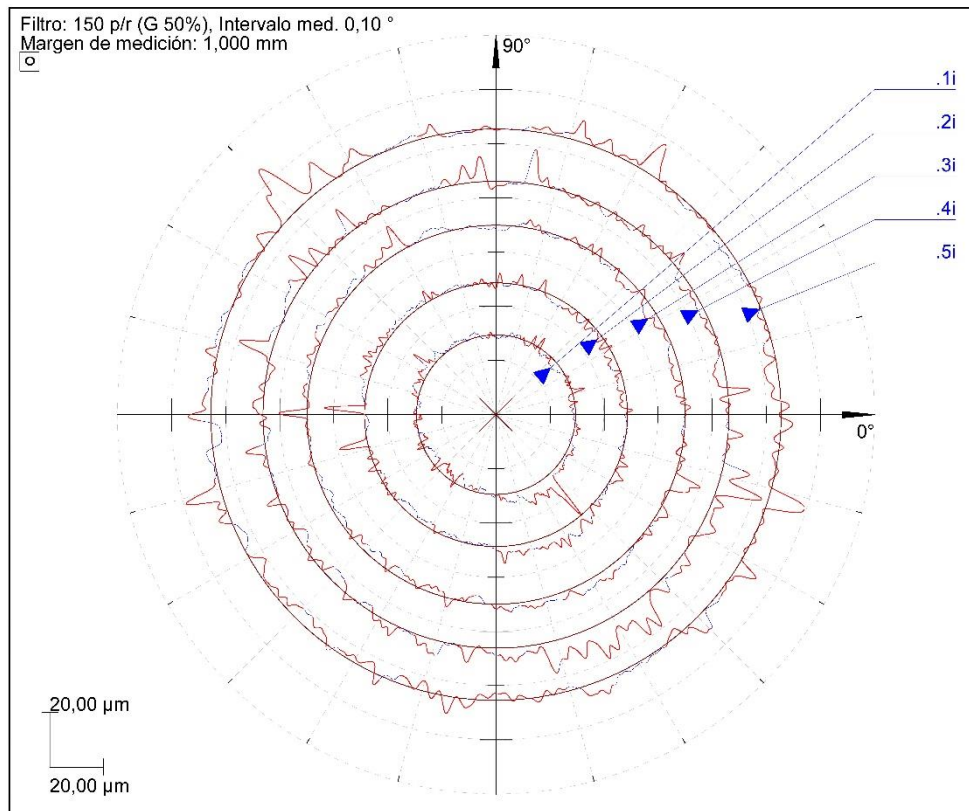
Filtro: 2,500 mm (G 50%), Intervalo med. 0,1000 mm
Margen de medición: 1,000 mm



Perfil o Operación	Posición [mm, °]	Resultado [µm] \varnothing [mm]	Tolerancia [mm]	Ref.	Referencia	Excentricidad [µm]	Fas [°] Inc [µm/m]
.1	147,4	7,81		LSS			-720
.2	219,4	8,56		LSS			-755
.3	291,3	10,50		LSS			-925
.4	3,3	10,43		LSS			-934
.5	75,2	9,55		LSS			-852
/1		10,50	0,1000	LSS			

ANEXOS

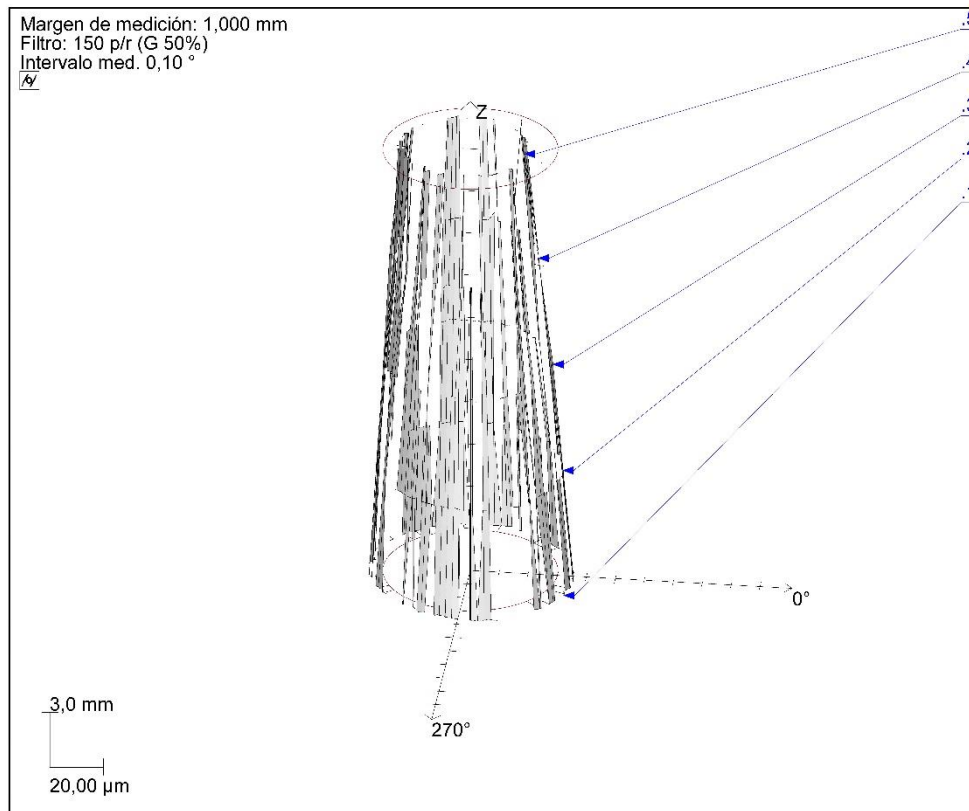
Mahr	FORM-PC		PROBETAS PARA ENSAYOS DE RECTIFICADO Ti6Al4V	31.05.2017
	V4.28.7 SP5		GRADO EN INGENIERIA AEROESPACIAL	15:43:28
Pieza Ti6Al4V	Nº de plano -		Operación TiVw170ae20	Verificador M-14
Protocolo de medición: 418		Centro de comprobación:		Firma
Probadora de formas: MMQ 44 CNC		Nº orden: -		Nº de lote: 0
Comentario -				



Perfil o Operación	Posición [mm, °]	Resultado [µm] Ø-[mm]	Tolerancia [mm]	Ref.	Referencia	Excentricidad [µm]	Fas [°] Inc [µm/m]
.1	187,27	10,01	0,0000	LSC		20,83	39,80
.2	194,77	8,82		LSC		21,18	43,66
.3	202,27	7,97		LSC		22,72	47,41
.4	209,77	16,35		LSC		22,73	46,80
.5	217,27	18,43		LSC		24,25	52,91
/5		18,43		LSC			

ANEXOS

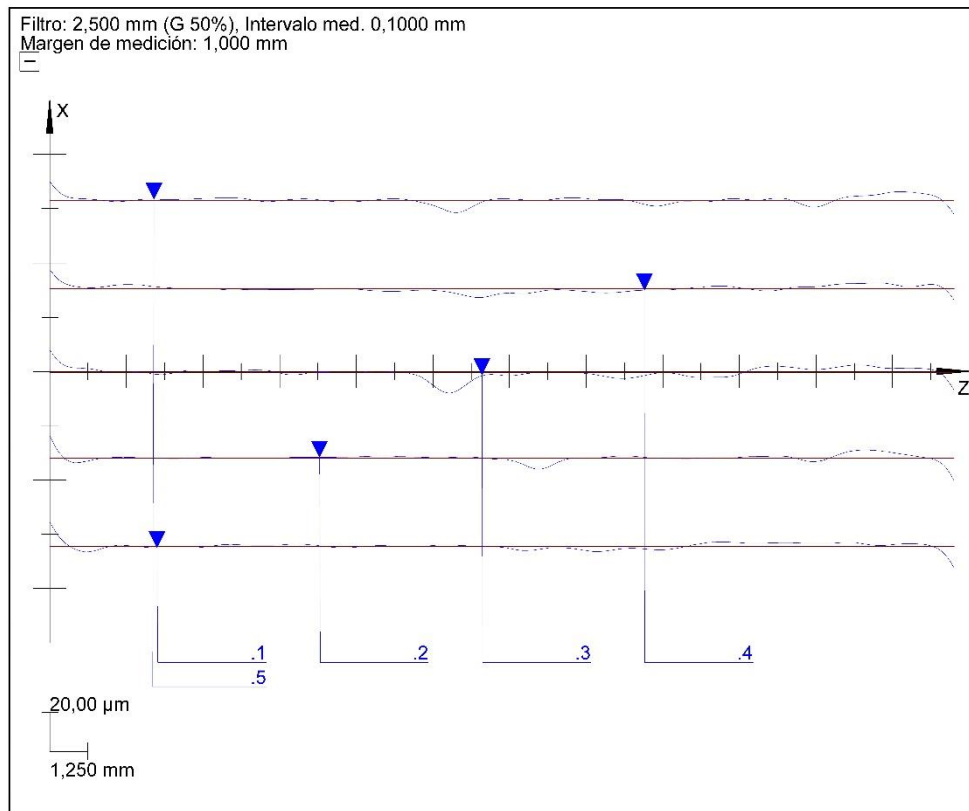
Mahr	FORM-PC		PROBETAS PARA ENSAYOS DE RECTIFICADO Ti6Al4V	31.05.2017	
	V4.28.7 SP5		GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL	15:43:28	
	Pieza Ti6Al4V		Nº de plano -	Operación TiVw170ae20	Verificador M-14
	Protocolo de medición: 418		Centro de comprobación:		Firma
	Probadora de formas: MMQ 44 CNC		Nº orden: -	Nº de lote: 0	
Comentario -					



Perfil o Operación	Posición [mm, °]	Resultado [µm] $\overline{\sigma}$ [mm]	Tolerancia [mm]	Ref.	Referencia	Excentricidad [µm]	Fas [°] Inc [µm/m]
/5		/5 41,08	0,0000	LSC			

ANEXOS

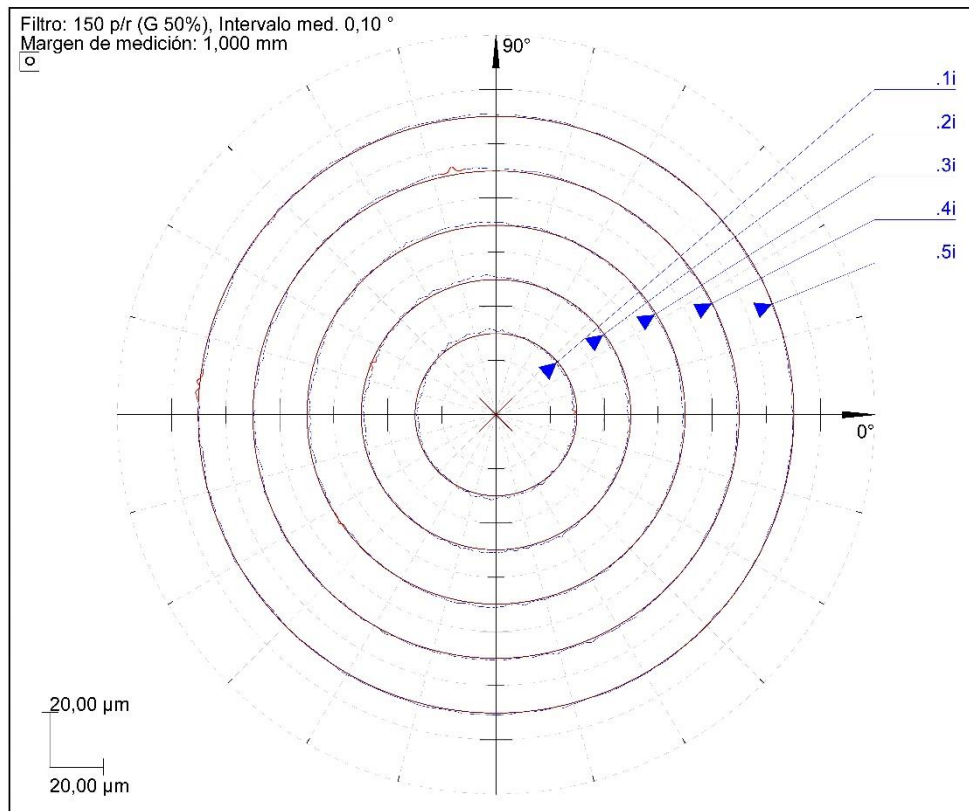
Mahr	FORM-PC		PROBETAS PARA ENSAYOS DE RECTIFICADO Ti6Al4V	31.05.2017	
	V4.28.7 SP5		GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL	15:40:15	
	Pieza Ti6Al4V		Nº de plano -	Operación TiVw170ae20	Verificador M-14
	Protocolo de medición: 418		Centro de comprobación:		Firma
	Probadora de formas: MMQ 44 CNC		Nº orden: -	Nº de lote: 0	
Comentario -					



Perfil o Operación	Posición [mm, °]	Resultado [µm] σ [mm]	Tolerancia [mm]	Ref.	Referencia	Excentricidad [µm]	Fas [°] Inc [µm/m]
.1	35,0	16,94	0,1000	LSS			955
.2	106,9	16,59		LSS			988
.3	178,9	15,95		LSS			862
.4	250,8	11,19		LSS			678
.5	322,8	12,22		LSS			722
/4		16,94		LSS			

ANEXOS

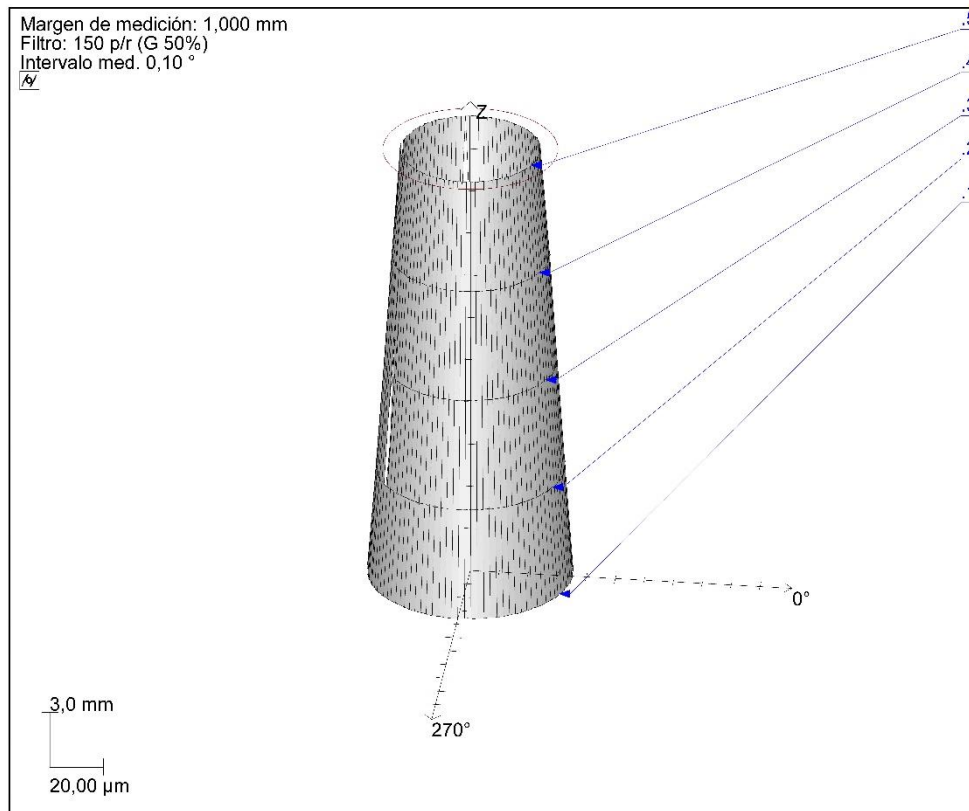
Mahr	FORM-PC		PROBETAS PARA ENSAYOS DE RECTIFICADO Ti6Al4V	31.05.2017
	V4.28.7 SP5		GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL	15:33:51
Pieza Ti6Al4V	Nº de plano -		Operación TiVw170ae40	Verificador M-14
Protocolo de medición: 418		Centro de comprobación:		Firma
Probadora de formas: MMQ 44 CNC		Nº orden: -		Nº de lote: 0
Comentario -				



Perfil o Operación	Posición [mm, °]	Resultado [µm] Ø-[mm]	Tolerancia [mm]	Ref.	Referencia	Excentricidad [µm]	Fas [°] Inc [µm/m]
.1	146,30	3,52	0,0000	LSC		5,16	303,14
.2	153,80	3,58		LSC		3,53	1,66
.3	161,30	3,35		LSC		6,24	48,59
.4	168,80	3,10		LSC		10,39	62,75
.5	176,30	2,43		LSC		14,85	67,98
/4		3,58		LSC			

ANEXOS

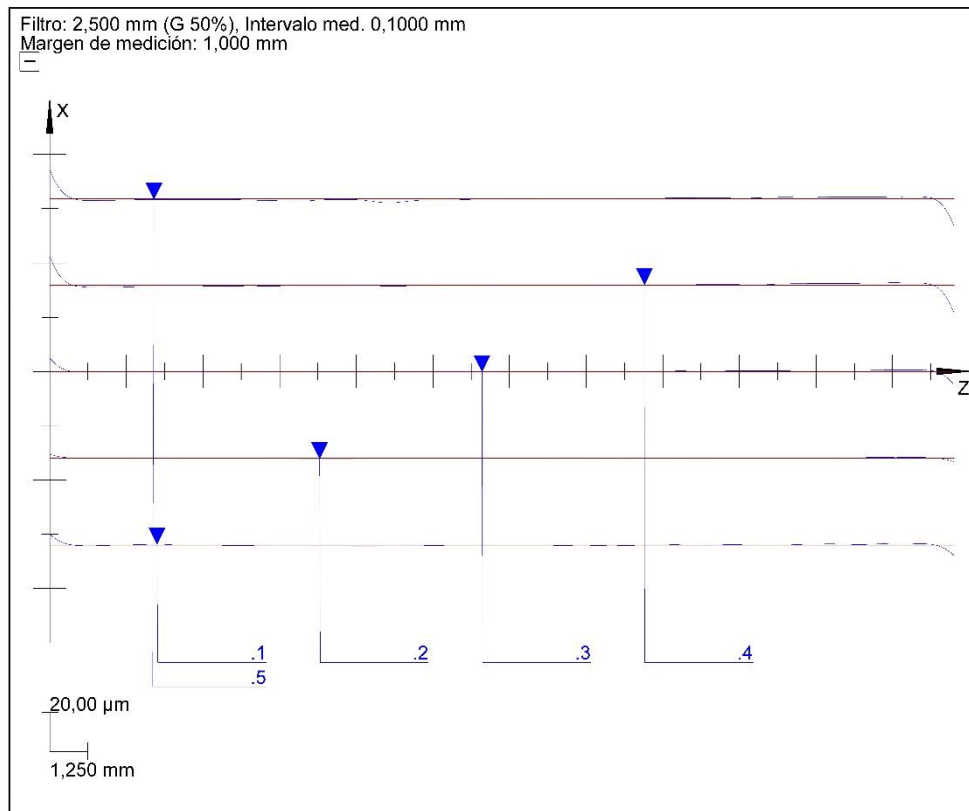
Mahr	FORM-PC		PROBETAS PARA ENSAYOS DE RECTIFICADO Ti6Al4V	31.05.2017
	V4.28.7 SP5		GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL	15:33:52
Pieza Ti6Al4V	Nº de plano -		Operación TiVw170ae40	Verificador M-14
Protocolo de medición: 418		Centro de comprobación:		Firma
Probadora de formas: MMQ 44 CNC		Nº orden: -		Nº de lote: 0
Comentario -				



Perfil o Operación	Posición [mm, °]	Resultado [µm] $\overline{\sigma}$ [mm]	Tolerancia [mm]	Ref.	Referencia	Excentricidad [µm]	Fas [°] Inc [µm/m]
<i>/4</i>		<i>/4</i> 26,20	0,0000	LSC			

ANEXOS

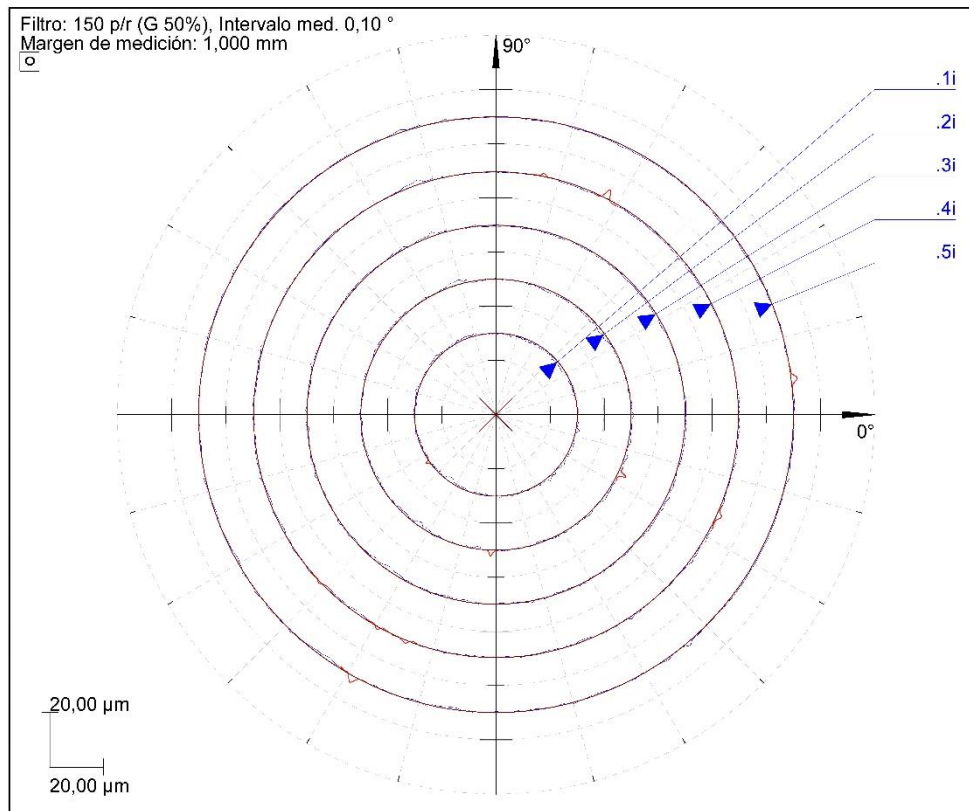
Mahr		FORM-PC V4.28.7 SP5	LCA Laboratorio de Calidad	PROBETAS PARA ENSAYOS DE RECTIFICADO Ti6Al4V GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL	31.05.2017 15:30:15 Verificador M-14 Firma
Pieza Ti6Al4V	Nº de plano -	Operación TiVw170ae40			
Protocolo de medición: 418		Centro de comprobación:			
Probadora de formas: MMQ 44 CNC		Nº orden: -		Nº de lote: 0	
Comentario -					



Perfil o Operación	Posición [mm, °]	Resultado [µm] σ [mm]	Tolerancia [mm]	Ref.	Referencia	Excentricidad [µm]	Fas [°] Inc [µm/m]
.1	194,3	7,98		LSS			463
.2	266,2	2,68		LSS			155
.3	338,2	9,91		LSS			581
.4	50,1	20,87		LSS			1210
.5	122,1	20,62		LSS			1192
/3		20,87	0,1000	LSS			

ANEXOS

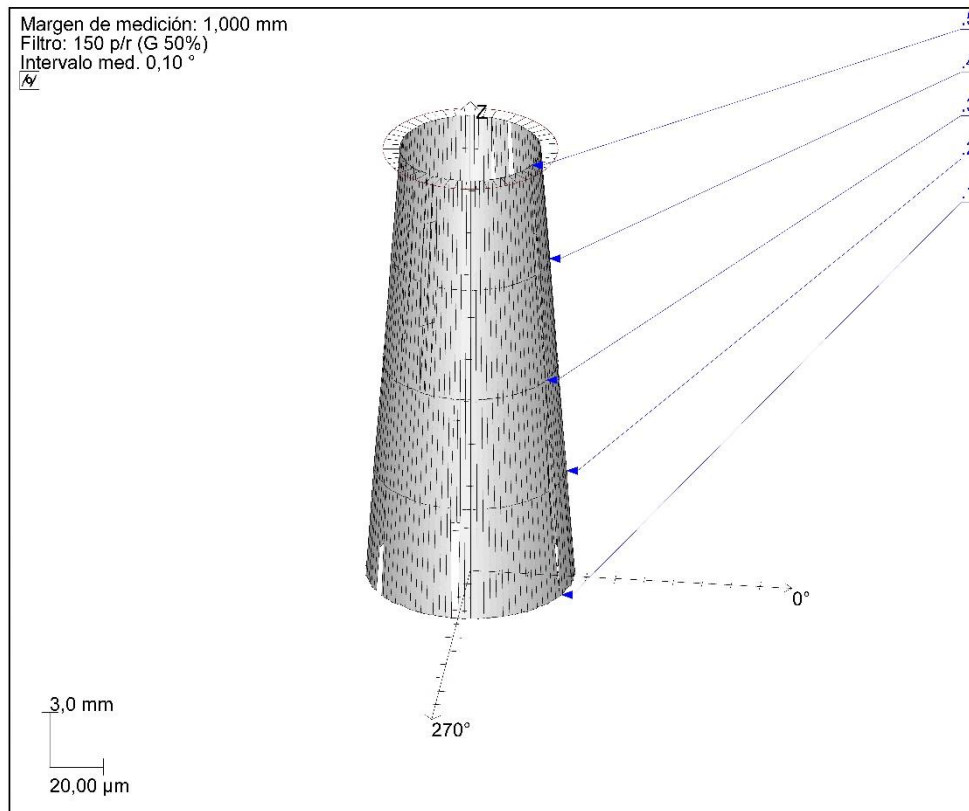
Mahr	FORM-PC		PROBETAS PARA ENSAYOS DE RECTIFICADO Ti6Al4V	31.05.2017 15:24:42
	V4.28.7 SP5		GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL	Verificador M-14
Pieza Ti6Al4V	Nº de plano -	Operación TiVw170ae80		Firma
Protocolo de medición: 418		Centro de comprobación:		
Probadora de formas: MMQ 44 CNC		Nº orden: -		Nº de lote: 0
Comentario -				



Perfil o Operación	Posición [mm, °]	Resultado [µm] Ø-[mm]	Tolerancia [mm]	Ref.	Referencia	Excentricidad [µm]	Fas [°] Inc [µm/m]
.1	107,01	3,27		LSC		23,70	45,41
.2	114,51	3,23		LSC		24,46	47,43
.3	122,01	2,99		LSC		25,16	49,60
.4	129,51	2,74		LSC		25,86	51,49
.5	137,01	2,50		LSC		26,66	53,57
/3		3,27	0,0000	LSC			

ANEXOS

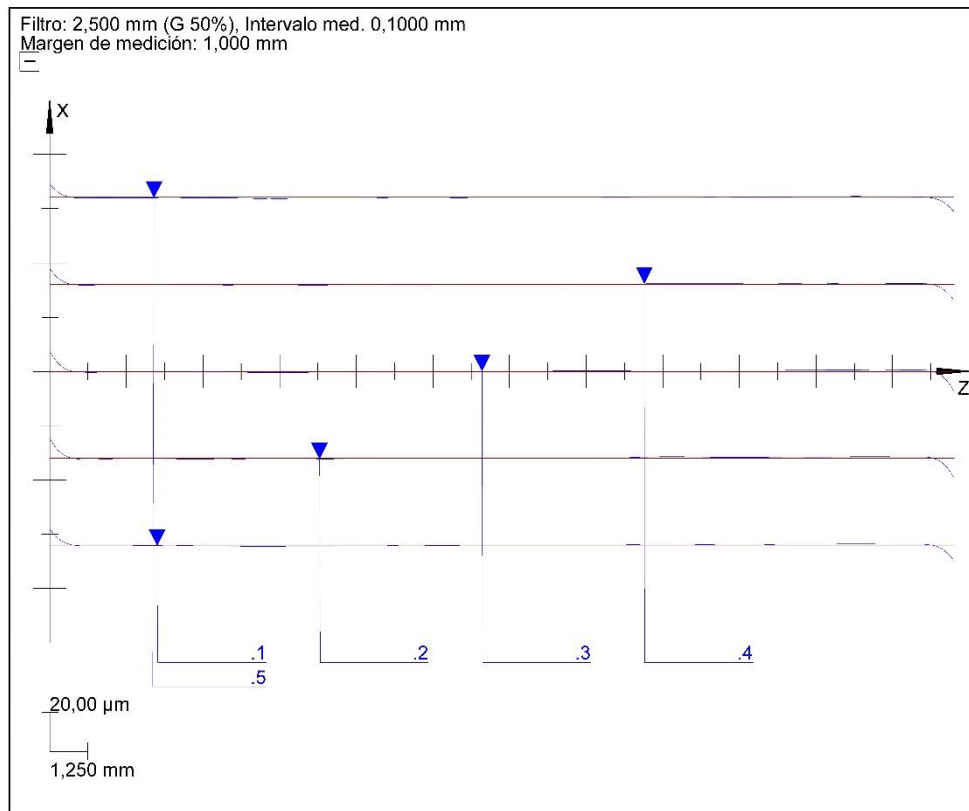
Mahr	FORM-PC		PROBETAS PARA ENSAYOS DE RECTIFICADO Ti6Al4V	31.05.2017 15:24:42
	V4.28.7 SP5		GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL	Verificador M-14 Firma
Pieza Ti6Al4V	Nº de plano -	Operación TiVw170ae80		
Protocolo de medición: 418		Centro de comprobación:		
Probadora de formas: MMQ 44 CNC		Nº orden: -		Nº de lote: 0
Comentario -				



Perfil o Operación	Posición [mm, °]	Resultado [µm] \varnothing [mm]	Tolerancia [mm]	Ref.	Referencia	Excentricidad [µm]	Fas [°] Inc [µm/m]
/3		\varnothing 26,23	0,0000	LSC			

ANEXOS

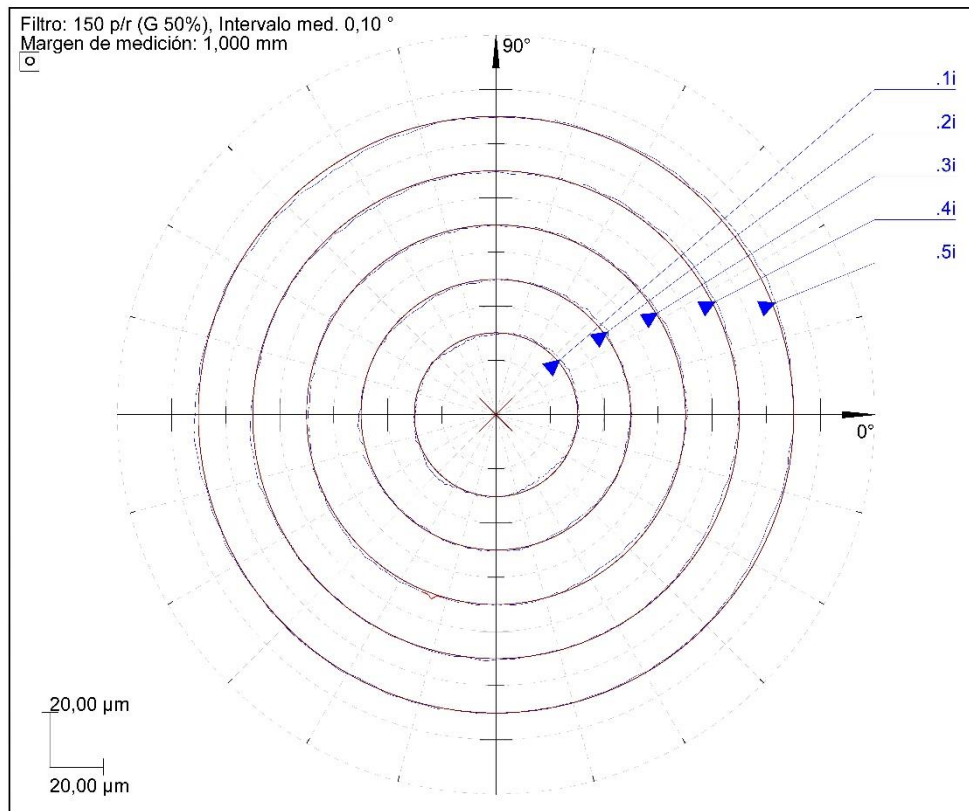
Mahr	FORM-PC		PROBETAS PARA ENSAYOS DE RECTIFICADO Ti6Al4V	31.05.2017	
	V4.28.7 SP5		GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL	15:21:11	
	Pieza Ti6Al4V		Nº de plano -	Operación TiVw170ae80	Verificador M-14
	Protocolo de medición: 418		Centro de comprobación:		Firma
	Probadora de formas: MMQ 44 CNC		Nº orden: -	Nº de lote: 0	
Comentario -					



Perfil o Operación	Posición [mm, °]	Resultado [µm] $\overline{\sigma}$ [mm]	Tolerancia [mm]	Ref.	Referencia	Excentricidad [µm]	Fas [°] Inc [µm/m]
.1	352,4	11,73		LSS			677
.2	64,4	14,41		LSS			839
.3	136,3	14,74		LSS			855
.4	208,3	11,58		LSS			670
.5	280,2	10,19		LSS			587
/2		14,74	0,1000	LSS			

ANEXOS

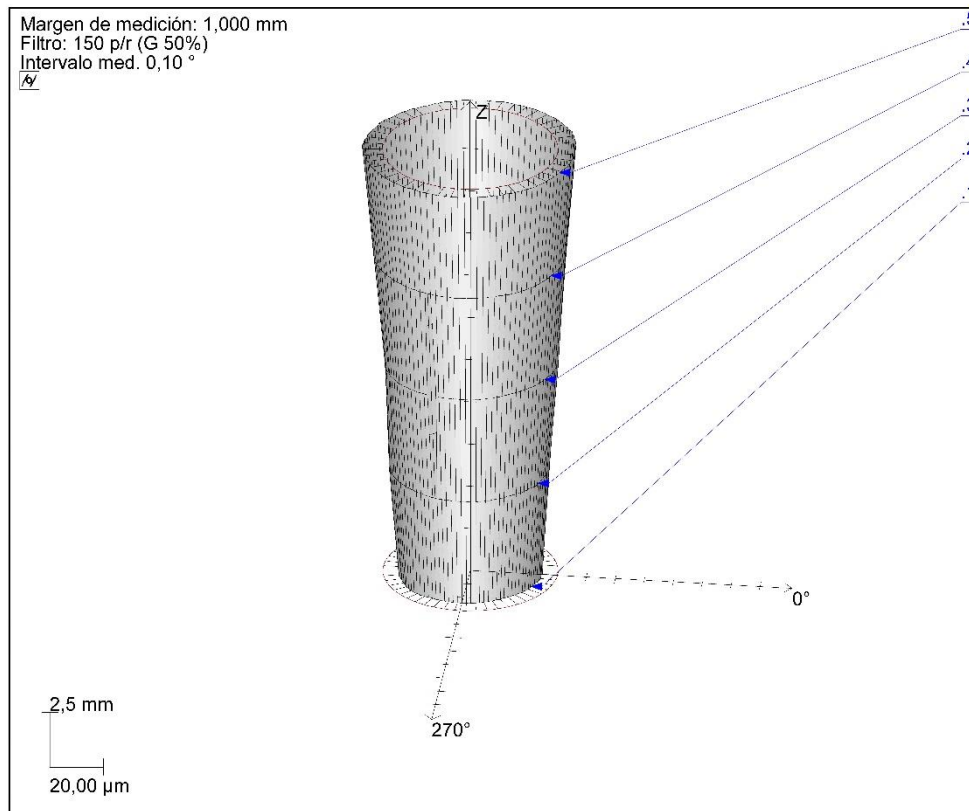
Mahr	FORM-PC		PROBETAS PARA ENSAYOS DE RECTIFICADO Ti6Al4V	31.05.2017
	V4.28.7 SP5		GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL	17:01:16
Pieza Ti6Al4V	Nº de plano -		Operación TiVw230ae0	Verificador M-14
Protocolo de medición: 418		Centro de comprobación:		Firma
Probadora de formas: MMQ 44 CNC		Nº orden: -		Nº de lote: 0
Comentario -				



Perfil o Operación	Posición [mm, °]	Resultado [μm] Ø-[mm]	Tolerancia [mm]	Ref.	Referencia	Excentricidad [μm]	Fas [°] Inc [μm/m]
.1	74,10	3,88	0,0000	LSC		6,29	183,80
.2	80,35	3,36		LSC		3,59	185,15
.3	86,60	3,30		LSC		2,07	192,17
.4	92,85	3,25		LSC		0,52	313,66
.5	99,10	4,21		LSC		2,94	354,65
/1		4,21		LSC			

ANEXOS

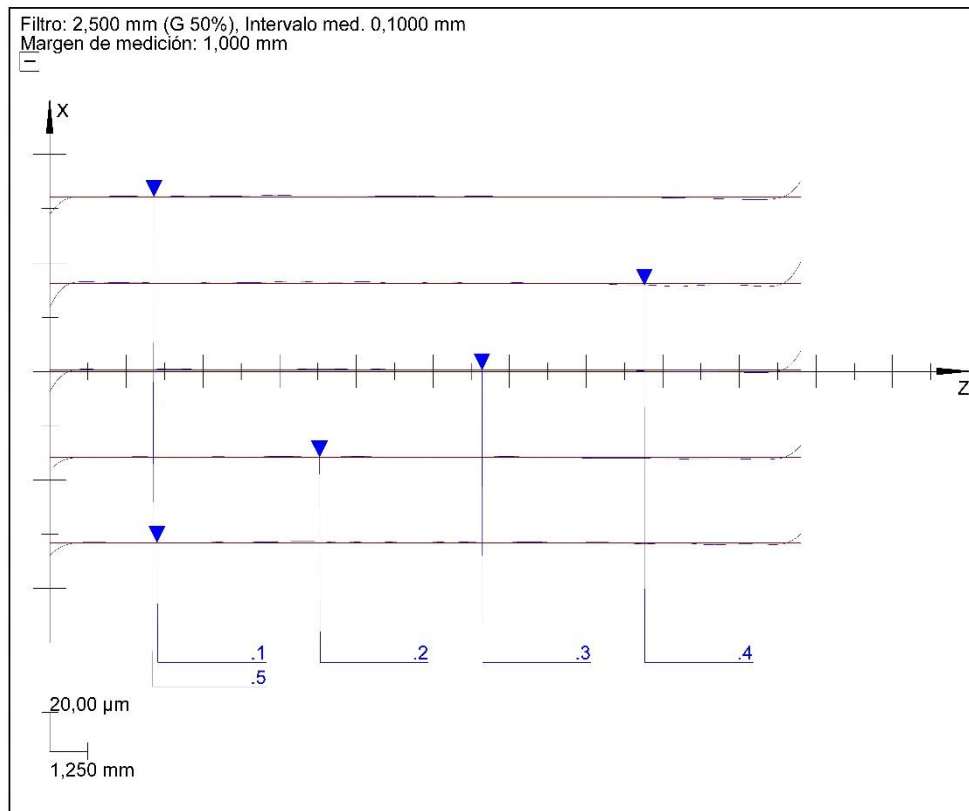
Mahr	FORM-PC	LCA Laboratorio de Calidad	PROBETAS PARA ENSAYOS DE RECTIFICADO Ti6Al4V	31.05.2017
	V4.28.7 SP5		GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL	17:01:16
Pieza Ti6Al4V	Nº de plano -		Operación TiVw230ae0	Verificador M-14
Protocolo de medición: 418		Centro de comprobación:		Firma
Probadora de formas: MMQ 44 CNC		Nº orden: -		Nº de lote: 0
Comentario -				



Perfil o Operación	Posición [mm, °]	Resultado [µm] $\overline{\sigma}$ [mm]	Tolerancia [mm]	Ref.	Referencia	Excentricidad [µm]	Fas [°] Inc [µm/m]
/1		$\overline{\sigma}$ 27,58	0,0000	LSC			

ANEXOS

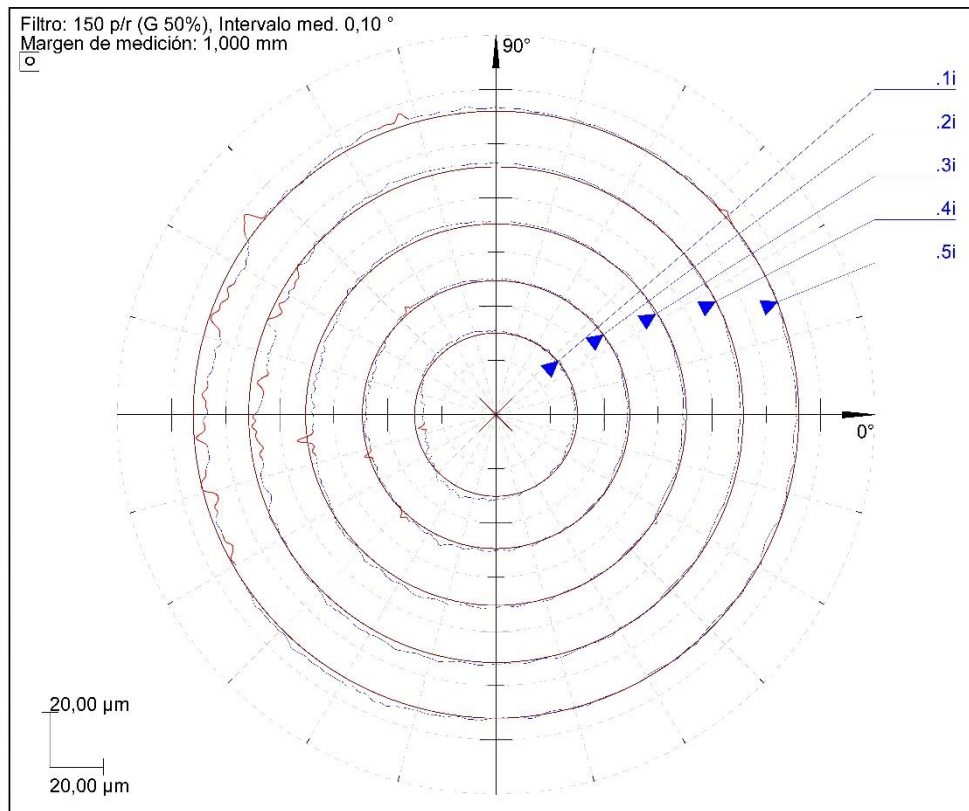
Mahr		FORM-PC V4.28.7 SP5	LCA Laboratorio de Calidad	PROBETAS PARA ENSAYOS DE RECTIFICADO Ti6Al4V GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL	31.05.2017 16:58:36 Verificador M-14 Firma
Pieza Ti6Al4V	Nº de plano -	Operación TiVw230ae0			
Protocolo de medición: 418		Centro de comprobación:			
Probadora de formas: MMQ 44 CNC		Nº orden: -			Nº de lote: 0
Comentario -					



Perfil o Operación	Posición [mm, °]	Resultado [µm] σ [mm]	Tolerancia [mm]	Ref.	Referencia	Excentricidad [µm]	Fas [°] Inc [µm/m]
.1	335,6	7,91	0,1000	LSS			-555
.2	47,5	9,08		LSS			-637
.3	119,5	14,95		LSS			-1038
.4	191,4	16,61		LSS			-1166
.5	263,4	12,21		LSS			-856
/1		16,61		LSS			

ANEXOS

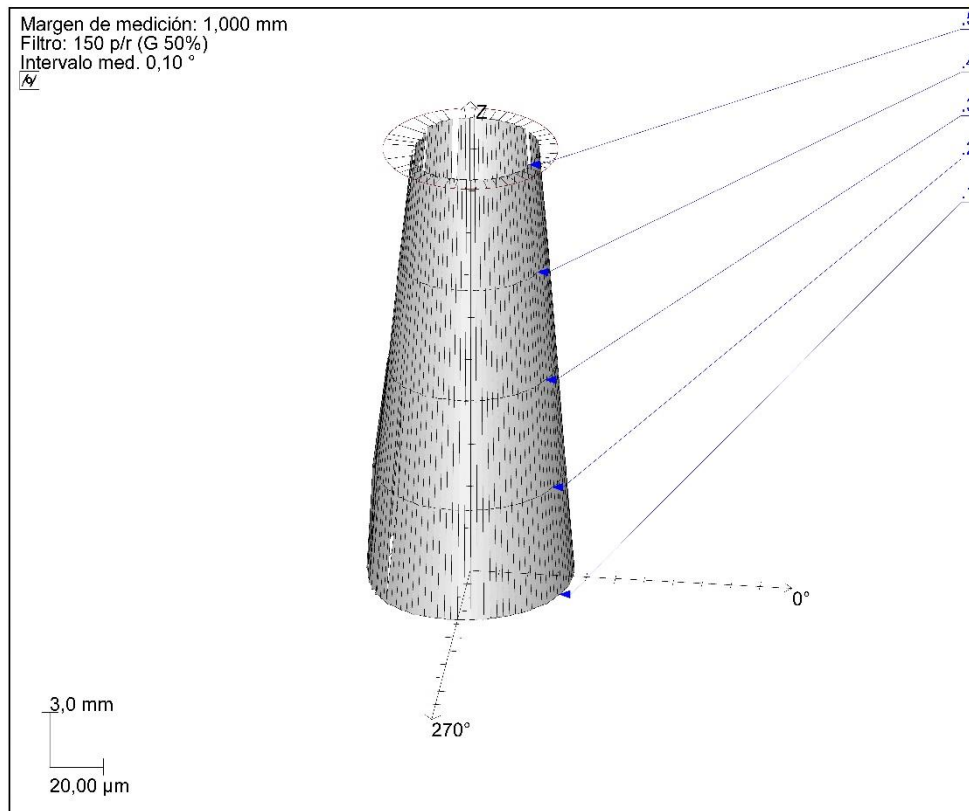
Mahr	FORM-PC		PROBETAS PARA ENSAYOS DE RECTIFICADO Ti6Al4V	31.05.2017 17:29:58
	V4.28.7 SP5		GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL	Verificador M-14
Pieza Ti6Al4V	Nº de plano -	Operación TiVw230ae20		Firma
Protocolo de medición: 418		Centro de comprobación:		
Probadora de formas: MMQ 44 CNC		Nº orden: -		Nº de lote: 0
Comentario -				



Perfil o Operación	Posición [mm, °]	Resultado [μm] Ø-[mm]	Tolerancia [mm]	Ref.	Referencia	Excentricidad [μm]	Fas [°] Inc [μm/m]
.1	188,76	6,90	0,0000	LSC		44,80	21,71
.2	196,26	5,12		LSC		45,91	21,62
.3	203,76	5,96		LSC		46,14	21,85
.4	211,26	8,42		LSC		46,52	21,85
.5	218,76	10,15		LSC		47,29	21,66
/5		10,15		LSC			

ANEXOS

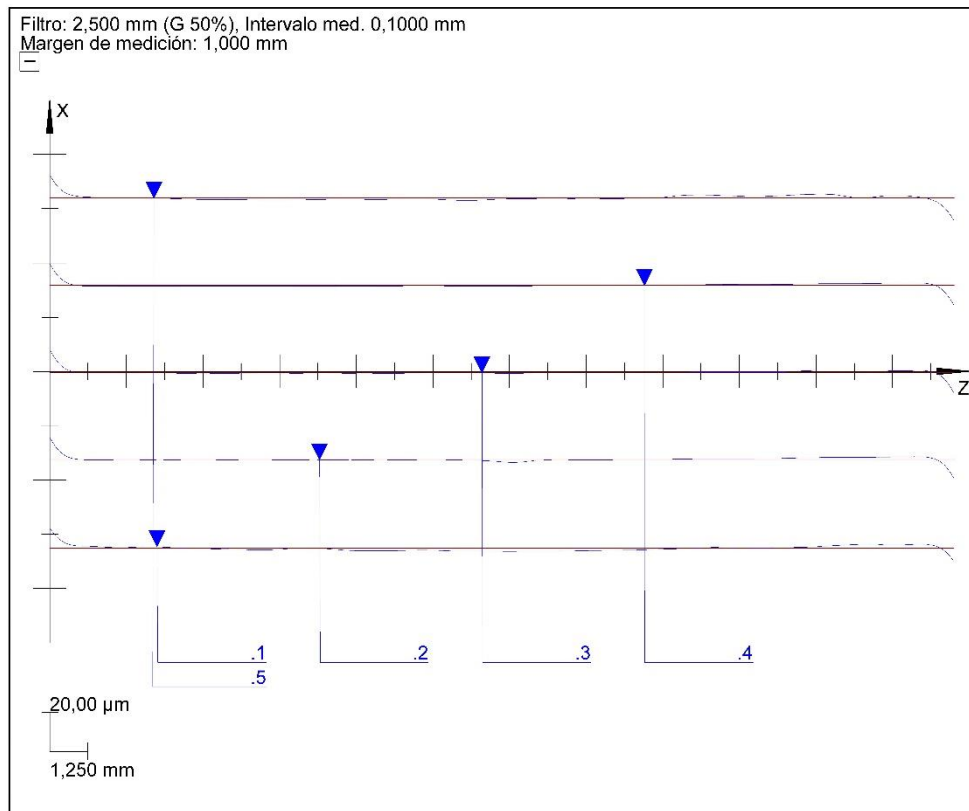
Mahr	FORM-PC		PROBETAS PARA ENSAYOS DE RECTIFICADO Ti6Al4V	31.05.2017	
	V4.28.7 SP5		GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL	17:29:58	
	Pieza Ti6Al4V		Nº de plano -	Operación TiVw230ae20	Verificador M-14
	Protocolo de medición: 418		Centro de comprobación:		Firma
	Probadora de formas: MMQ 44 CNC		Nº orden: -	Nº de lote: 0	
Comentario -					



Perfil o Operación	Posición [mm, °]	Resultado [µm] $\overline{\sigma}$ [mm]	Tolerancia [mm]	Ref.	Referencia	Excentricidad [µm]	Fas [°] Inc [µm/m]
/5		$\overline{\sigma}$ 40,91	0,0000	LSC			

ANEXOS

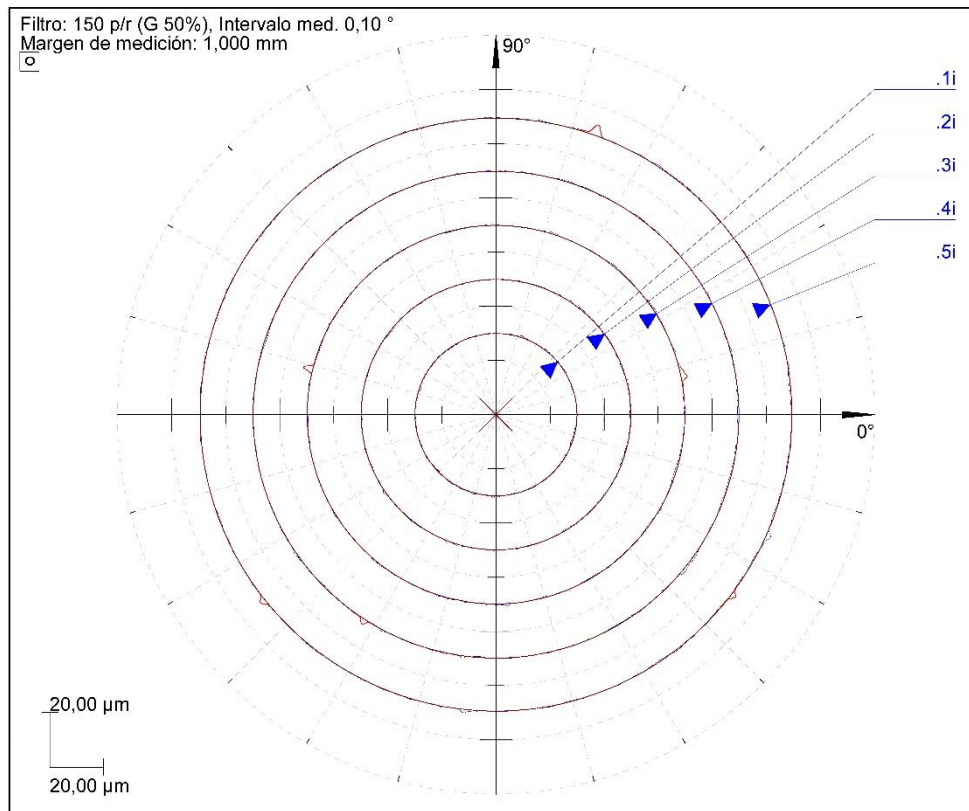
Mahr		FORM-PC V4.28.7 SP5	LCA Laboratorio de Calidad	PROBETAS PARA ENSAYOS DE RECTIFICADO Ti6Al4V GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL	31.05.2017 17:19:30 Verificador M-14 Firma
Pieza Ti6Al4V	Nº de plano -	Operación TiVw230ae20			
Protocolo de medición: 418		Centro de comprobación:			
Probadora de formas: MMQ 44 CNC		Nº orden: -		Nº de lote: 0	
Comentario -					



Perfil o Operación	Posición [mm, °]	Resultado [µm] σ :[mm]	Tolerancia [mm]	Ref.	Referencia	Excentricidad [µm]	Fas [°] Inc [µm/m]
.1	217,5	12,30		LSS			712
.2	289,5	15,09		LSS			874
.3	1,4	16,04		LSS			925
.4	73,4	15,37		LSS			889
.5	145,3	16,91		LSS			931
/4		16,91	0,1000	LSS			

ANEXOS

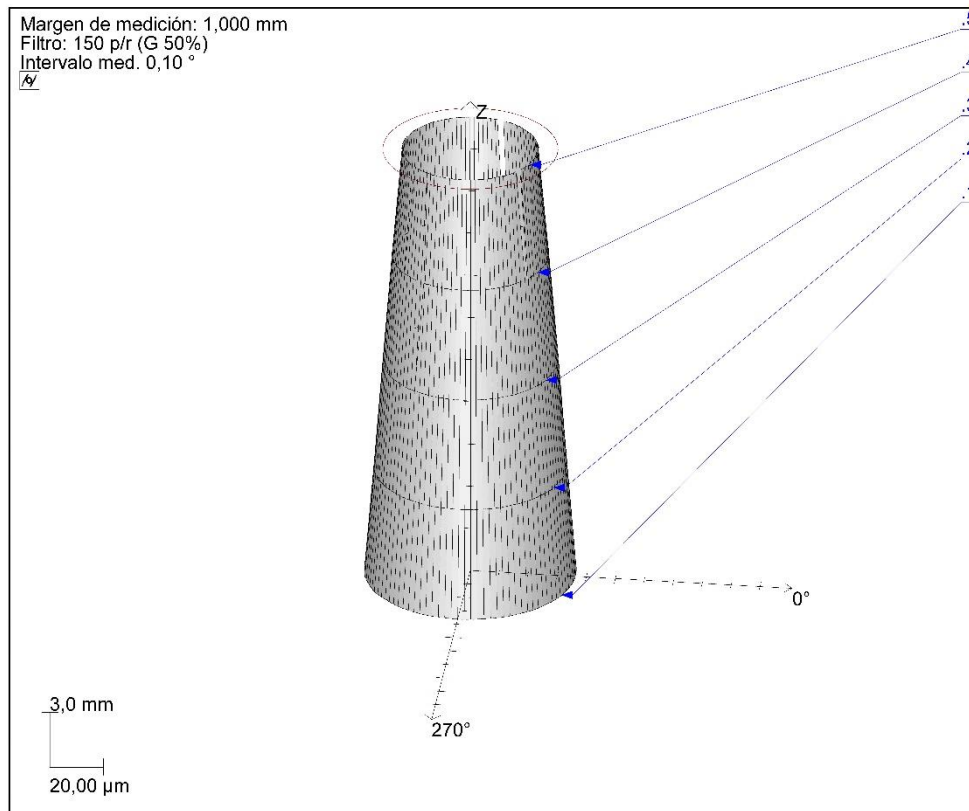
Mahr	FORM-PC		PROBETAS PARA ENSAYOS DE RECTIFICADO Ti6Al4V	31.05.2017
	V4.28.7 SP5		GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL	17:15:43
Pieza Ti6Al4V	Nº de plano -		Operación TiVw230ae40	Verificador M-14
Protocolo de medición: 418		Centro de comprobación:		Firma
Probadora de formas: MMQ 44 CNC		Nº orden: -		Nº de lote: 0
Comentario -				



Perfil o Operación	Posición [mm, °]	Resultado [μm] Ø-[mm]	Tolerancia [mm]	Ref.	Referencia	Excentricidad [μm]	Fas [°] Inc [μm/m]
.1	148,18	1,30		LSC		42,01	26,63
.2	155,68	1,36		LSC		42,65	26,71
.3	163,18	1,43		LSC		43,19	26,85
.4	170,68	1,55		LSC		43,69	26,99
.5	178,18	2,27		LSC		44,38	26,69
/3		2,27	0,0000	LSC			

ANEXOS

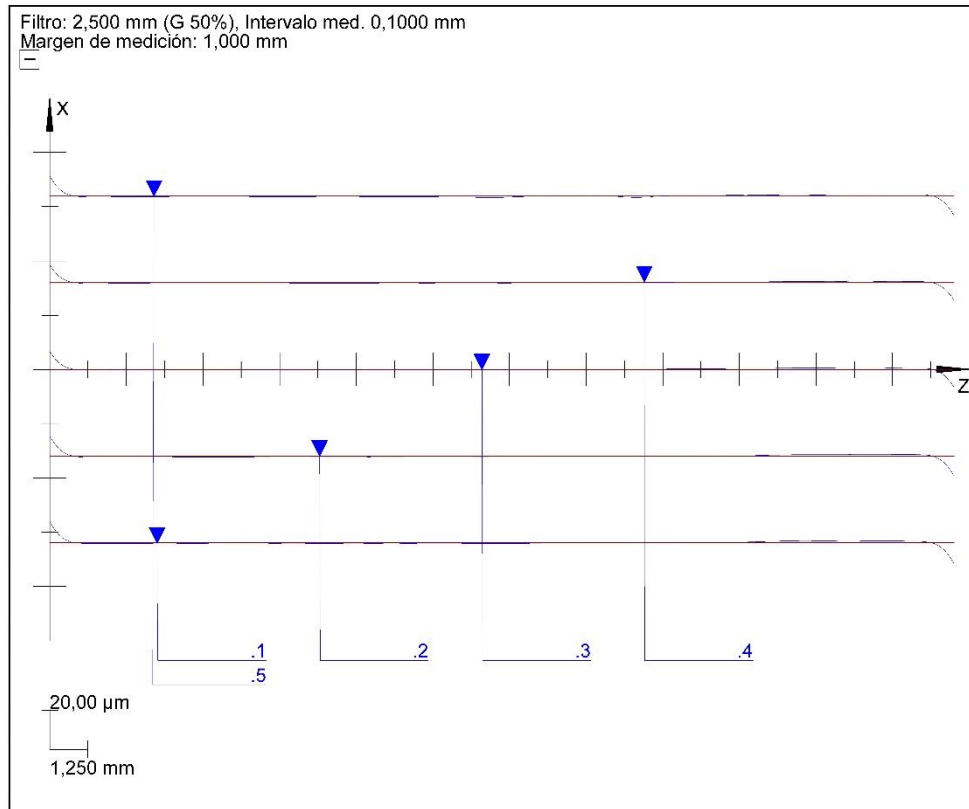
Mahr	FORM-PC		PROBETAS PARA ENSAYOS DE RECTIFICADO Ti6Al4V	31.05.2017
	V4.28.7 SP5		GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL	17:15:43
Pieza Ti6Al4V	Nº de plano -		Operación TiVw230ae40	Verificador M-14
Protocolo de medición: 418		Centro de comprobación:		Firma
Probadora de formas: MMQ 44 CNC		Nº orden: -		Nº de lote: 0
Comentario -				



Perfil o Operación	Posición [mm, °]	Resultado [µm] $\overline{\sigma}$ [mm]	Tolerancia [mm]	Ref.	Referencia	Excentricidad [µm]	Fas [°] Inc [µm/m]
/3		$\overline{\sigma}$ 27,50	0,0000	LSC			

ANEXOS

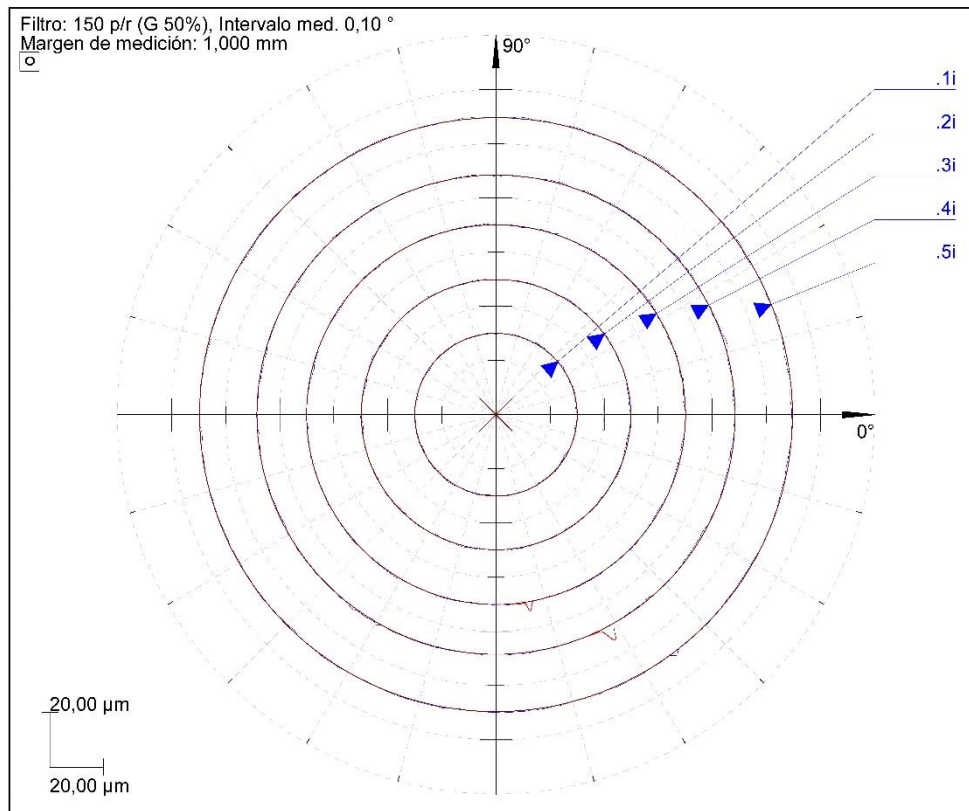
Mahr		FORM-PC V4.28.7 SP5	 LCA Laboratorio de Calidad	PROBETAS PARA ENSAYOS DE RECTIFICADO Ti6Al4V GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL	31.05.2017 17:12:27 Verificador M-14 Firma
Pieza Ti6Al4V	Nº de plano -	Operación TiVw230ae40			
Protocolo de medición: 418		Centro de comprobación:			
Probadora de formas: MMQ 44 CNC		Nº orden: -		Nº de lote: 0	
Comentario -					



Perfil o Operación	Posición [mm, °]	Resultado [µm] $\overline{\sigma}$:[mm]	Tolerancia [mm]	Ref.	Referencia	Excentricidad [µm]	Fas [°] Inc [µm/m]
.1	16,9	15,47		LSS			885
.2	88,8	14,62		LSS			844
.3	160,8	13,17		LSS			759
.4	232,7	12,94		LSS			747
.5	304,7	14,38		LSS			830
/3		15,47	0,1000	LSS			

ANEXOS

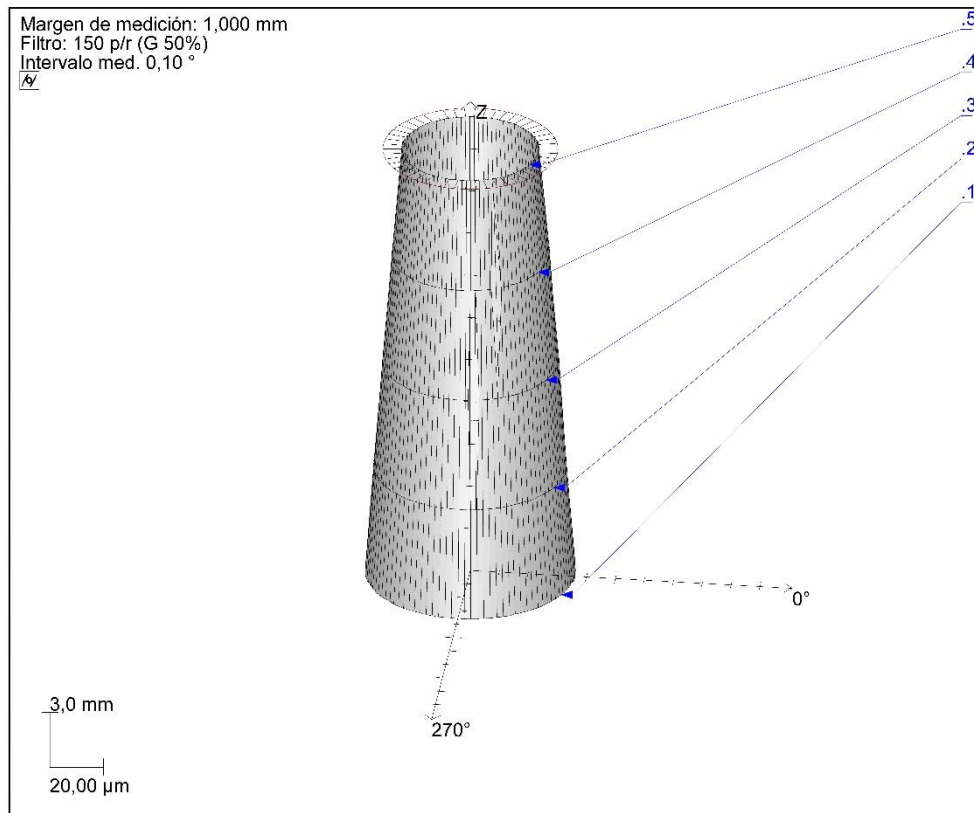
Mahr	FORM-PC		PROBETAS PARA ENSAYOS DE RECTIFICADO Ti6Al4V	31.05.2017
	V4.28.7 SP5		GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL	17:08:39
Pieza Ti6Al4V	Nº de plano -		Operación TiVw230ae80	Verificador M-14
Protocolo de medición: 418		Centro de comprobación:		Firma
Probadora de formas: MMQ 44 CNC		Nº orden: -		Nº de lote: 0
Comentario -				



Perfil o Operación	Posición [mm, °]	Resultado [μm] Ø-[mm]	Tolerancia [mm]	Ref.	Referencia	Excentricidad [μm]	Fas [°] Inc [μm/m]
.1	109,23	1,06		LSC		38,99	25,13
.2	116,73	1,36		LSC		39,85	25,13
.3	124,23	1,29		LSC		40,46	24,94
.4	131,73	4,76		LSC		41,23	24,82
.5	139,23	2,26		LSC		42,10	24,61
/2		4,76	0,0000	LSC			

ANEXOS

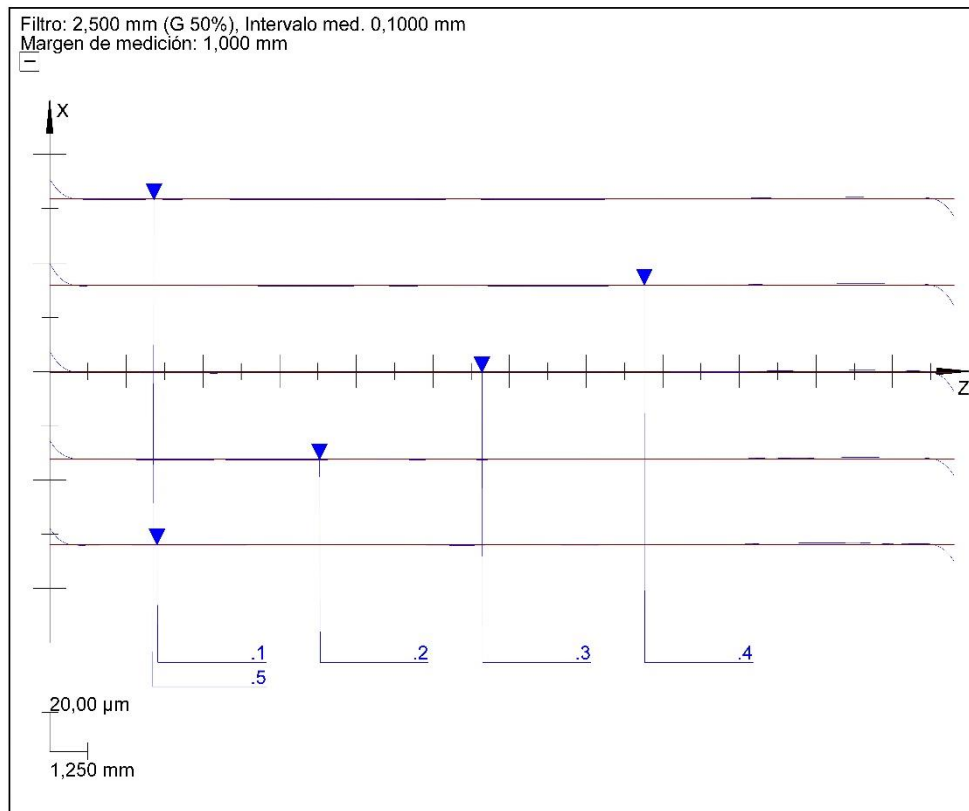
Mahr	FORM-PC		PROBETAS PARA ENSAYOS DE RECTIFICADO Ti6Al4V	31.05.2017	
	V4.28.7 SP5		GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL	17:08:39	
	Pieza Ti6Al4V		Nº de plano -	Operación TiVw230ae80	Verificador M-14
	Protocolo de medición: 418		Centro de comprobación:		Firma
	Probadora de formas: MMQ 44 CNC		Nº orden: -	Nº de lote: 0	
Comentario -					



Perfil o Operación	Posición [mm, °]	Resultado [µm] $\overline{\sigma}$ [mm]	Tolerancia [mm]	Ref.	Referencia	Excentricidad [µm]	Fas [°] Inc [µm/m]
I/2		$\overline{\sigma}$ 26,38	0,0000	LSC			

ANEXOS

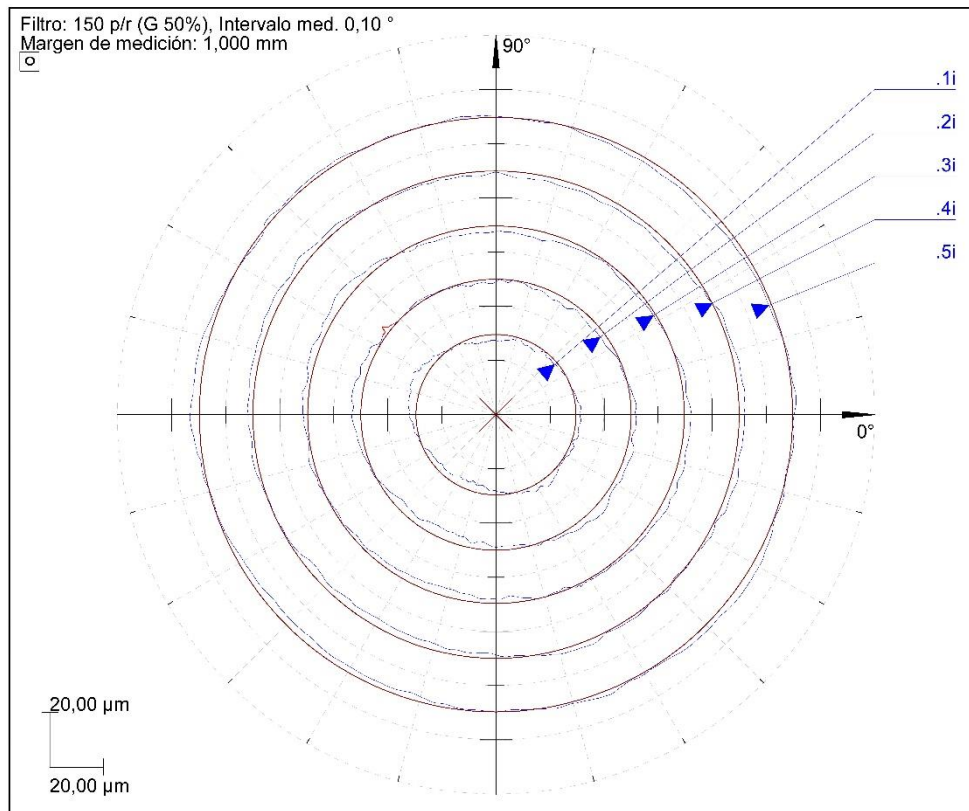
Mahr	FORM-PC	LCA Laboratorio de Calidad	PROBETAS PARA ENSAYOS DE RECTIFICADO Ti6Al4V	31.05.2017
	V4.28.7 SP5		GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL	17:05:24
Pieza Ti6Al4V	Nº de plano -	Operación TiVw230ae80	Verificador M-14	Firma
Protocolo de medición: 418		Centro de comprobación:		
Probadora de formas: MMQ 44 CNC		Nº orden: -	Nº de lote: 0	
Comentario -				



Perfil o Operación	Posición [mm, °]	Resultado [µm] \overline{x} :[mm]	Tolerancia [mm]	Ref.	Referencia	Excentricidad [µm]	Fas [°] Inc [µm/m]
.1	176,2	12,04		LSS			711
.2	248,2	12,74		LSS			733
.3	320,1	14,73		LSS			846
.4	32,1	15,55		LSS			895
.5	104,0	13,75		LSS			794
/2		15,55	0,1000	LSS			

ANEXOS

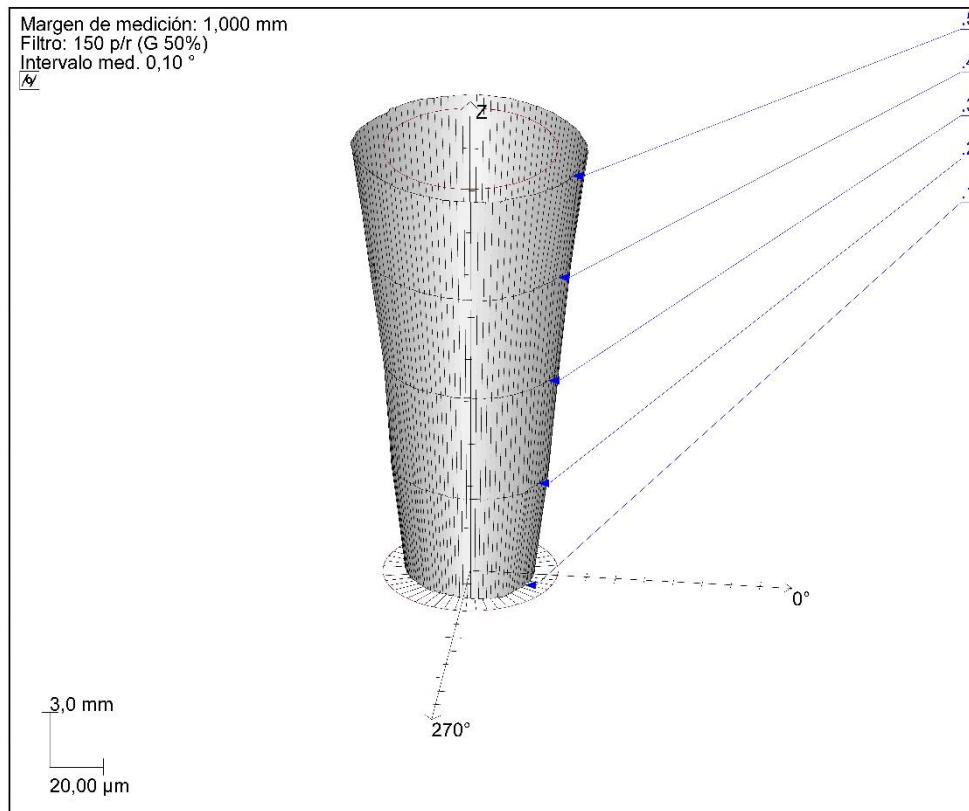
Mahr	FORM-PC		PROBETAS PARA ENSAYOS DE RECTIFICADO Ti6Al4V	31.05.2017
	V4.28.7 SP5		GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL	13:00:54
Pieza Ti6Al4V	Nº de plano -		Operación TiVw460ae0	Verificador M-14
Protocolo de medición: 418		Centro de comprobación:		Firma
Probadora de formas: MMQ 44 CNC		Nº orden: -		Nº de lote: 0
Comentario -				



Perfil o Operación	Posición [mm, °]	Resultado [µm] Ø-[mm]	Tolerancia [mm]	Ref.	Referencia	Excentricidad [µm]	Fas [°] Inc [µm/m]
.1	71,58	8,30		LSC		5,48	274,98
.2	79,08	7,66		LSC		4,51	277,26
.3	86,58	7,18		LSC		3,09	289,70
.4	94,08	6,13		LSC		2,99	328,63
.5	101,58	6,37		LSC		2,61	335,76
/3		8,30	0,0000	LSC			

ANEXOS

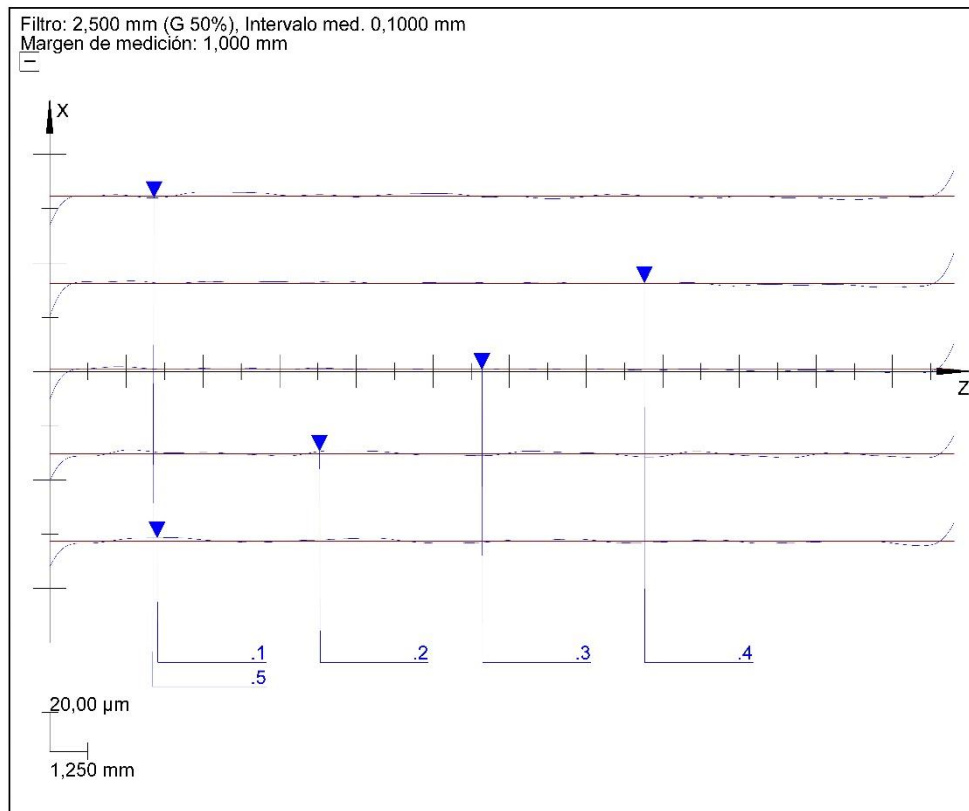
Mahr	FORM-PC		PROBETAS PARA ENSAYOS DE RECTIFICADO Ti6Al4V	31.05.2017
	V4.28.7 SP5		GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL	13:00:55
Pieza Ti6Al4V	Nº de plano -		Operación TiVw460ae0	Verificador M-14
Protocolo de medición: 418		Centro de comprobación:		Firma
Probadora de formas: MMQ 44 CNC		Nº orden: -		Nº de lote: 0
Comentario -				



Perfil o Operación	Posición [mm, °]	Resultado [µm] $\overline{\sigma}$ [mm]	Tolerancia [mm]	Ref.	Referencia	Excentricidad [µm]	Fas [°] Inc [µm/m]
/3		$\overline{\sigma}$ 43,93	0,0000	LSC			


ANEXOS

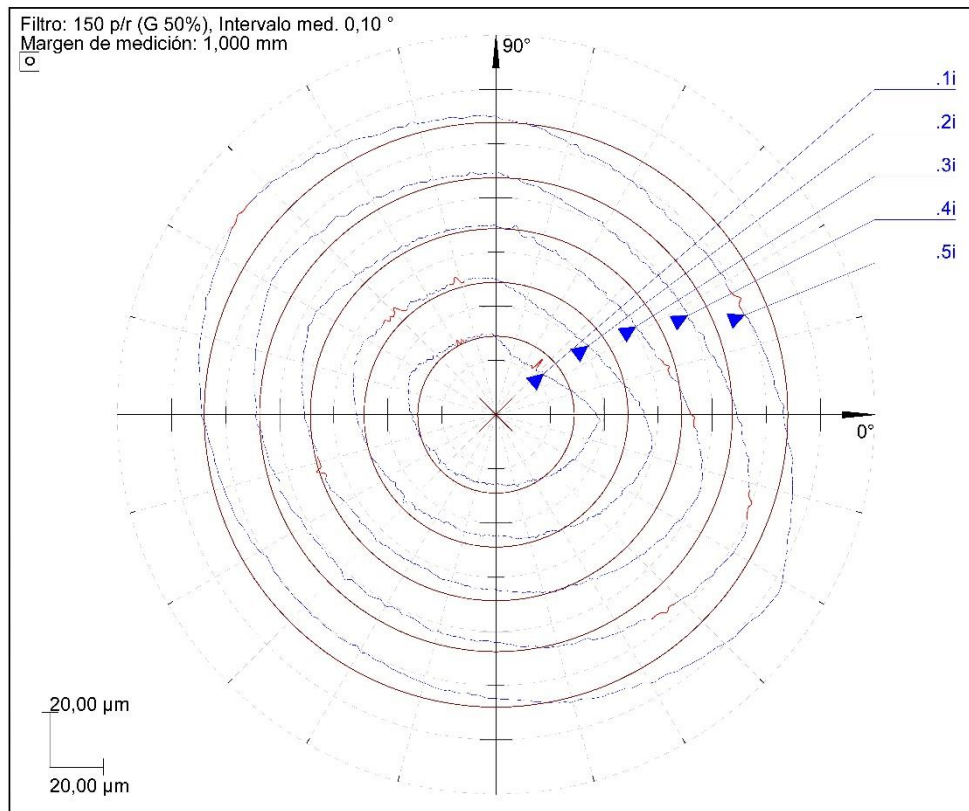
Mahr	FORM-PC		PROBETAS PARA ENSAYOS DE RECTIFICADO Ti6Al4V	31.05.2017
	V4.28.7 SP5		GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL	13:05:24
Pieza Ti6Al4V	Nº de plano -	Operación TiVw460ae0	Verificador M-14	Firma
Protocolo de medición: 418		Centro de comprobación:		
Probadora de formas: MMQ 44 CNC		Nº orden: -		Nº de lote: 0
Comentario -				



Perfil o Operación	Posición [mm, °]	Resultado [µm] σ [mm]	Tolerancia [mm]	Ref.	Referencia	Excentricidad [µm]	Fas [°] Inc [µm/m]
.1	36,7	16,26		LSS			-954
.2	108,7	16,77		LSS			-992
.3	180,6	20,56		LSS			-1206
.4	252,6	23,40		LSS			-1361
.5	324,5	20,34		LSS			-1177
/1		23,40	0,1000	LSS			

ANEXOS

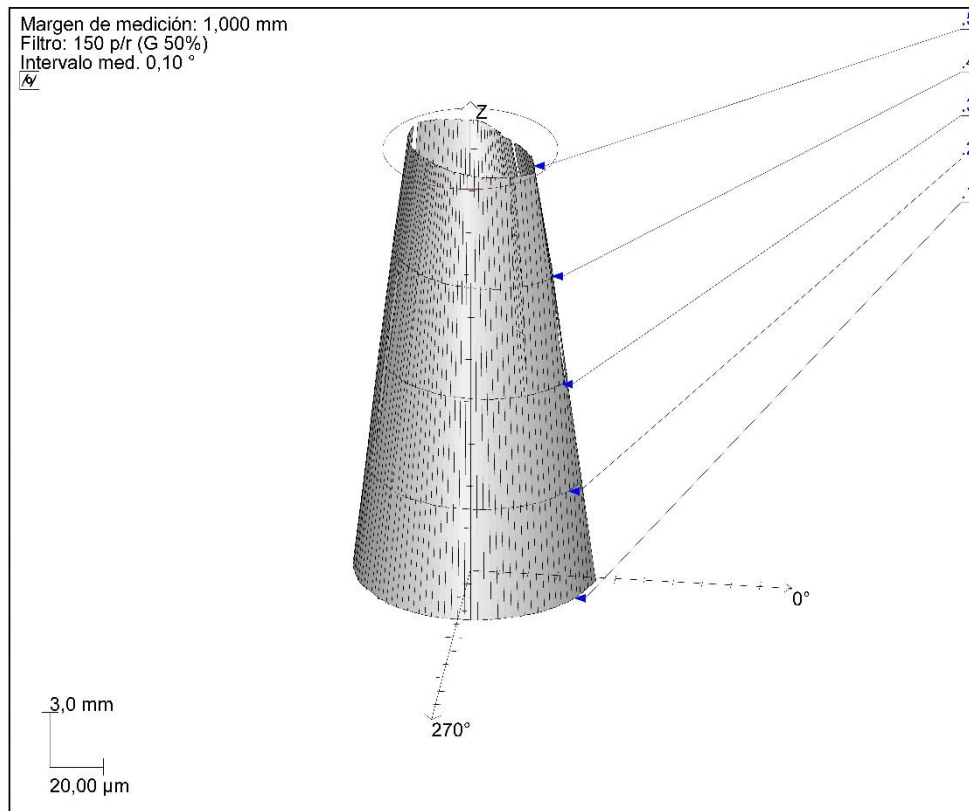
Mahr	FORM-PC		PROBETAS PARA ENSAYOS DE RECTIFICADO Ti6Al4V	31.05.2017
	V4.28.7 SP5		GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL	13:40:05
Pieza Ti6Al4V	Nº de plano -		Operación TiVw460ae20	Verificador M-14
Protocolo de medición: 418		Centro de comprobación:		Firma
Probadora de formas: MMQ 44 CNC		Nº orden: -		Nº de lote: 0
Comentario -				



Perfil o Operación	Posición [mm, °]	Resultado [μm] Ø-[mm]	Tolerancia [mm]	Ref.	Referencia	Excentricidad [μm]	Fas [°] Inc [μm/m]
.1	187,36	Ø 17,13		LSC		41,72	324,26
.2	194,86	Ø 17,85		LSC		46,86	328,42
.3	202,36	Ø 21,05		LSC		53,24	331,26
.4	209,86	Ø 24,26		LSC		60,41	333,38
.5	217,36	Ø 26,94		LSC		66,32	335,09
/6		Ø 26,94	0,0000	LSC			

ANEXOS

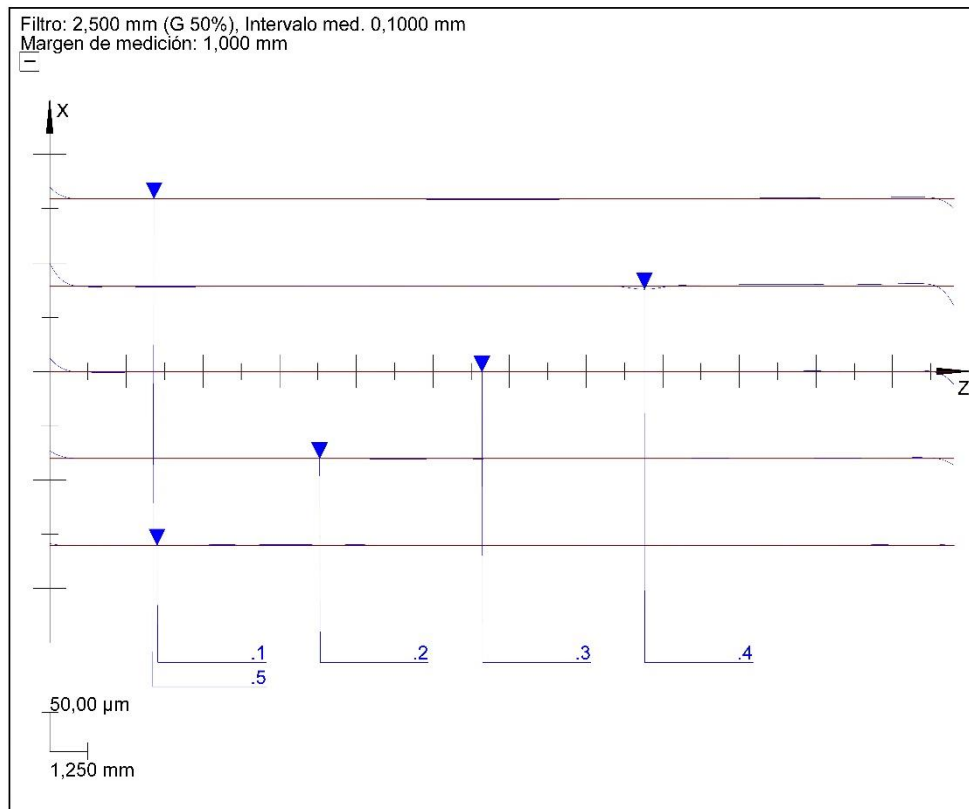
Mahr	FORM-PC		PROBETAS PARA ENSAYOS DE RECTIFICADO Ti6Al4V	31.05.2017
	V4.28.7 SP5		GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL	13:40:05
Pieza Ti6Al4V	Nº de plano -	Operación TiVw460ae20		Verificador M-14
Protocolo de medición: 418		Centro de comprobación:		Firma
Probadora de formas: MMQ 44 CNC		Nº orden: -		Nº de lote: 0
Comentario -				



Perfil o Operación	Posición [mm, °]	Resultado [µm] \varnothing [mm]	Tolerancia [mm]	Ref.	Referencia	Excentricidad [µm]	Fas [°] Inc [µm/m]
/6		\varnothing 58,19	0,0000	LSC			

ANEXOS

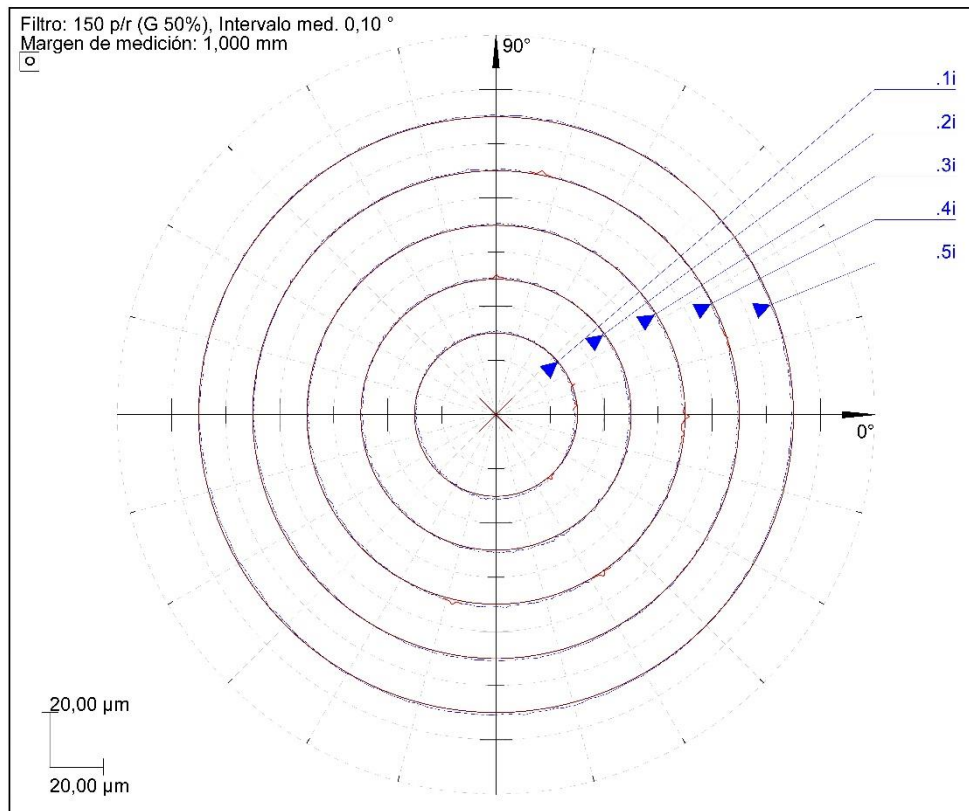
Mahr	FORM-PC	LCA Laboratorio de Calidad	PROBETAS PARA ENSAYOS DE RECTIFICADO Ti6Al4V	31.05.2017
	V4.28.7 SP5		GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL	13:35:59
Pieza Ti6Al4V	Nº de plano -		Operación TiVw460ae20	Verificador M-14
Protocolo de medición: 418		Centro de comprobación:		Firma
Probadora de formas: MMQ 44 CNC		Nº orden: -		Nº de lote: 0
Comentario -				



Perfil o Operación	Posición [mm, °]	Resultado [µm] σ [mm]	Tolerancia [mm]	Ref.	Referencia	Excentricidad [µm]	Fas [°] Inc [µm/m]
.1	148,9	2,31		LSS			175
.2	220,8	13,29		LSS			780
.3	292,8	24,67		LSS			1429
.4	4,7	38,87		LSS			2258
.5	76,7	19,41		LSS			1137
/6		38,87	0,1000	LSS			

ANEXOS

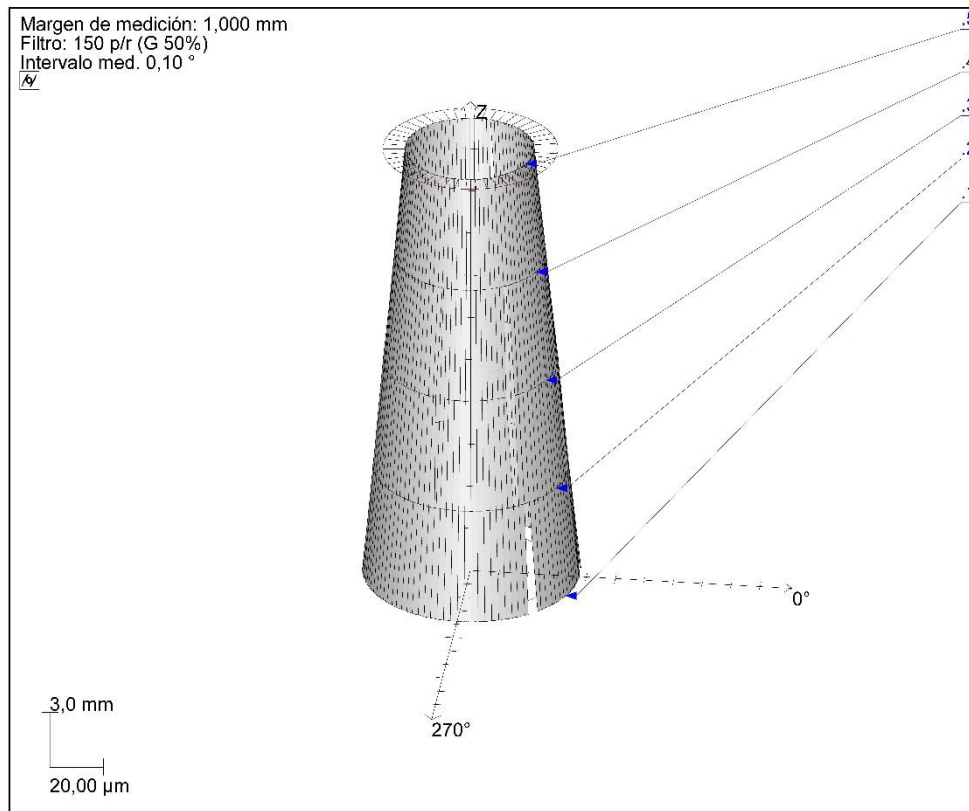
Mahr	FORM-PC		PROBETAS PARA ENSAYOS DE RECTIFICADO Ti6Al4V	31.05.2017
	V4.28.7 SP5		GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL	13:31:15
Pieza Ti6Al4V	Nº de plano -		Operación TiVw460ae40	Verificador M-14
Protocolo de medición: 418		Centro de comprobación:		Firma
Probadora de formas: MMQ 44 CNC		Nº orden: -		Nº de lote: 0
Comentario -				



Perfil o Operación	Posición [mm, °]	Resultado [µm] Ø-[mm]	Tolerancia [mm]	Ref.	Referencia	Excentricidad [µm]	Fas [°] Inc [µm/m]
.1	148,38	2,76	0,0000	LSC		10,08	146,65
.2	155,88	2,67		LSC		10,35	134,35
.3	163,38	2,96		LSC		10,89	123,99
.4	170,88	2,32		LSC		11,90	114,17
.5	178,38	2,47		LSC		13,07	106,02
/5		2,96		LSC			

ANEXOS

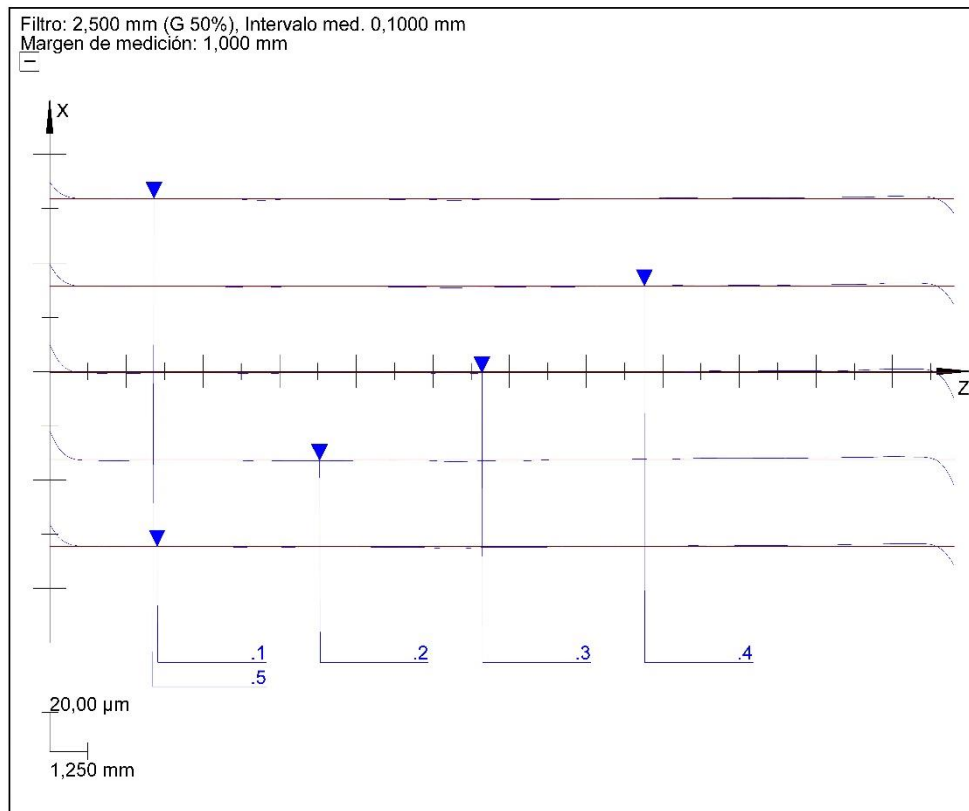
Mahr	FORM-PC		PROBETAS PARA ENSAYOS DE RECTIFICADO Ti6Al4V	31.05.2017
	V4.28.7 SP5		GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL	13:31:15
Pieza Ti6Al4V	Nº de plano -		Operación TiVw460ae40	Verificador M-14
Protocolo de medición: 418		Centro de comprobación:		Firma
Probadora de formas: MMQ 44 CNC		Nº orden: -		Nº de lote: 0
Comentario -				



Perfil o Operación	Posición [mm, °]	Resultado [µm] $\overline{\sigma}$ [mm]	Tolerancia [mm]	Ref.	Referencia	Excentricidad [µm]	Fas [°] Inc [µm/m]
/5		<i>/5</i> 33,61	0,0000	LSC			

ANEXOS

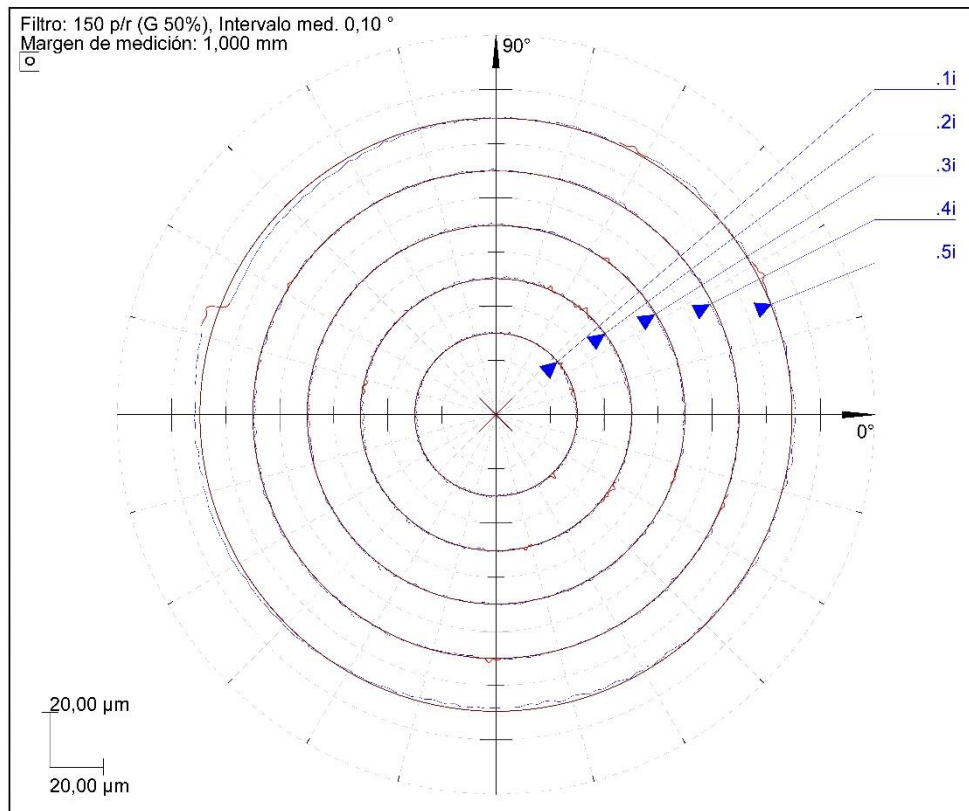
Mahr	FORM-PC	LCA Laboratorio de Calidad	PROBETAS PARA ENSAYOS DE RECTIFICADO Ti6Al4V	31.05.2017
	V4.28.7 SP5		GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL	13:26:32
Pieza Ti6Al4V	Nº de plano -	Operación TiVw460ae40	Verificador M-14	Firma
Protocolo de medición: 418		Centro de comprobación:		
Probadora de formas: MMQ 44 CNC		Nº orden: -		Nº de lote: 0
Comentario -				



Perfil o Operación	Posición [mm, °]	Resultado [µm] σ :[mm]	Tolerancia [mm]	Ref.	Referencia	Excentricidad [µm]	Fas [°] Inc [µm/m]
.1	308,2	15,12		LSS			874
.2	20,2	20,01		LSS			1160
.3	92,1	19,91		LSS			1155
.4	164,1	14,84		LSS			861
.5	236,0	11,43		LSS			666
/5		20,01	0,1000	LSS			

ANEXOS

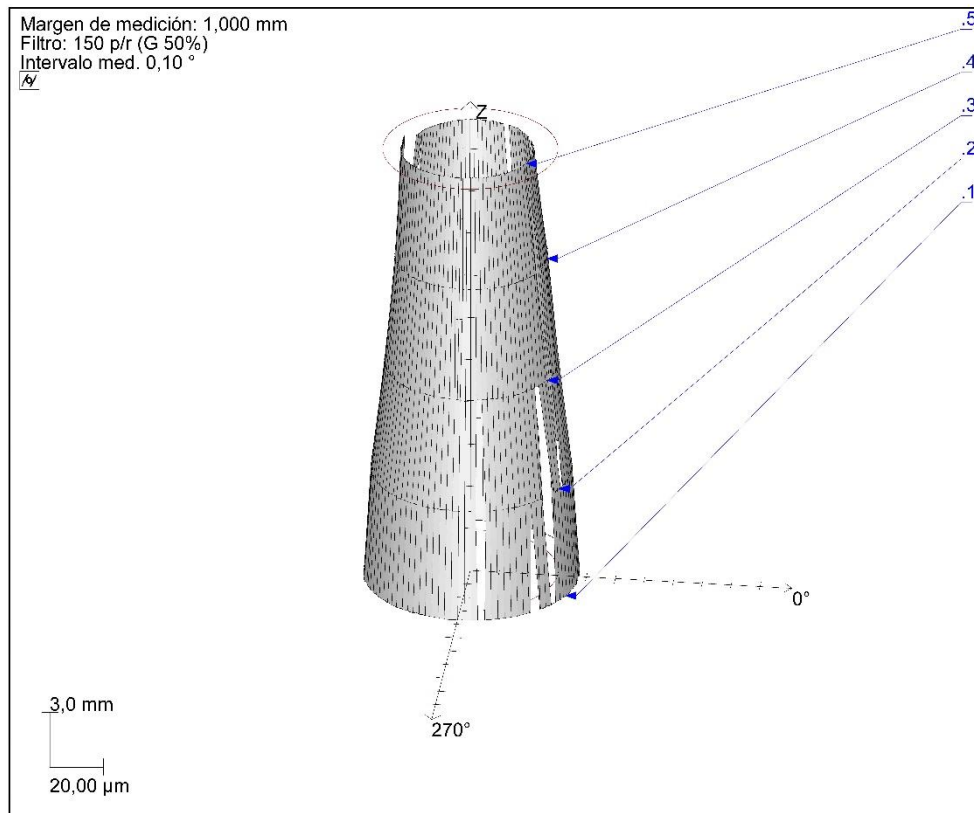
Mahr	FORM-PC		PROBETAS PARA ENSAYOS DE RECTIFICADO Ti6Al4V	31.05.2017 13:21:52
	V4.28.7 SP5		GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL	Verificador M-14
Pieza Ti6Al4V	Nº de plano -		Operación TiVw460ae80	Firma
Protocolo de medición: 418		Centro de comprobación:		
Probadora de formas: MMQ 44 CNC		Nº orden: -		Nº de lote: 0
Comentario -				



Perfil o Operación	Posición [mm, °]	Resultado [µm] Ø-[mm]	Tolerancia [mm]	Ref.	Referencia	Excentricidad [µm]	Fas [°] Inc [µm/m]
.1	109,31	1,92		LSC		12,02	168,76
.2	116,81	3,06		LSC		11,31	159,29
.3	124,31	2,84		LSC		11,39	147,90
.4	131,81	2,48		LSC		11,56	137,17
.5	139,31	7,61		LSC		11,83	117,69
/4		7,61	0,0000	LSC			

ANEXOS

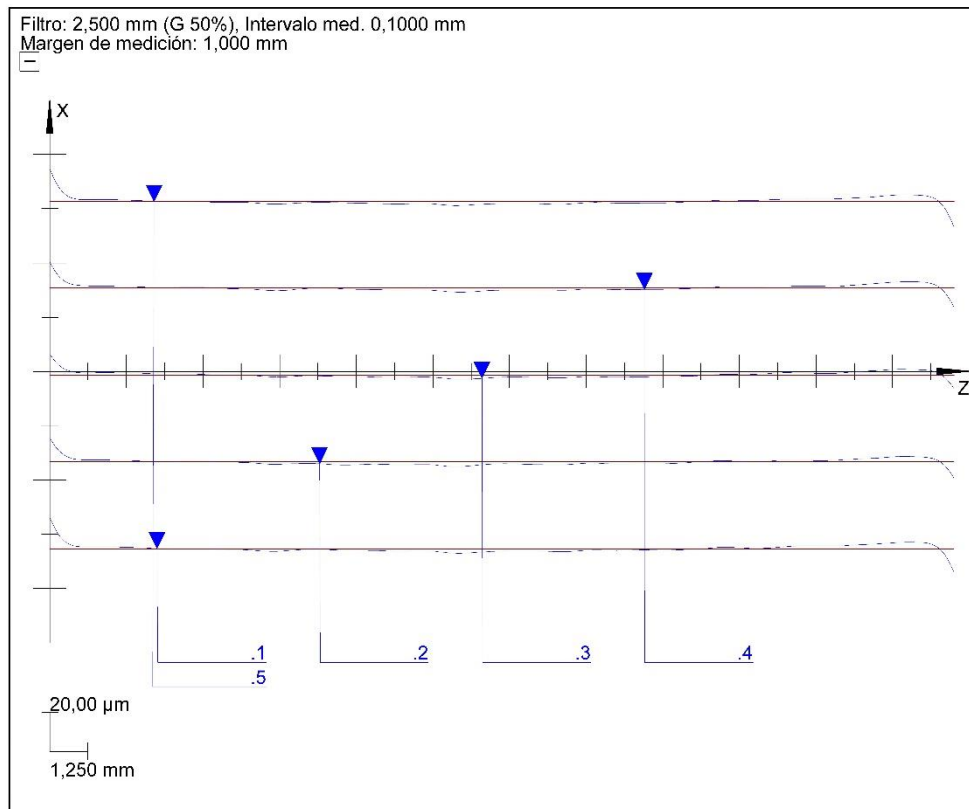
Mahr	FORM-PC		PROBETAS PARA ENSAYOS DE RECTIFICADO Ti6Al4V	31.05.2017	
	V4.28.7 SP5		GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL	13:21:53	
	Pieza Ti6Al4V		Nº de plano -	Operación TiVw460ae80	Verificador M-14
	Protocolo de medición: 418		Centro de comprobación:		Firma
	Probadora de formas: MMQ 44 CNC		Nº orden: -	Nº de lote: 0	
Comentario -					



Perfil o Operación	Posición [mm, °]	Resultado [µm] $\overline{\sigma}$ [mm]	Tolerancia [mm]	Ref.	Referencia	Excentricidad [µm]	Fas [°] Inc [µm/m]
<i>/4</i>		<i>/4</i> 34,05	0,0000	LSC			

ANEXOS

	FORM-PC			PROBETAS PARA ENSAYOS DE RECTIFICADO Ti6Al4V		31.05.2017 13:17:57 Verificador M-14 Firma
	V4.28.7 SP5			GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL		
	Pieza Ti6Al4V	Nº de plano -		Operación TiVw460ae80		
	Protocolo de medición: 418			Centro de comprobación:		
	Probadora de formas: MMQ 44 CNC			Nº orden: -		
Comentario -						



Perfil o Operación	Posición [mm, °]	Resultado [µm] $\overline{\sigma}$:[mm]	Tolerancia [mm]	Ref.	Referencia	Excentricidad [µm]	Fas [°] Inc [µm/m]
.1	107,6	20,35		LSS			1182
.2	179,6	14,90		LSS			858
.3	251,5	12,75		LSS			739
.4	323,5	16,72		LSS			971
.5	35,4	21,50		LSS			1244
/4		21,50	0,1000	LSS			

ANEXOS

ANEXO IX

Tabla donde se representan las mediciones de microdureza superficial obtenidas para cada ensayo realizado.

Ensayo	TiVw60ae0						TiVw60ae20						TiVw60ae40						TiVw60ae80					
Generatriz	G1		G2		G3		G1		G2		G3		G1		G2		G3		G1		G2		G3	
Medida	m1	m2	m1	m2	m1	m2	m1	m2	m1	m2	m1	m2	m1	m2	m1	m2	m1	m2	m1	m2	m1	m2	m1	m2
Microdureza Vickers [HV]	446	401	408	391	391	408	397	375	419	387	446	362	332	337	368	365	368	422	381	401	408	408	371	397

Ensayo	TiVw170ae0						TiVw170ae20						TiVw170ae40						TiVw170ae80					
Generatriz	G1		G2		G3		G1		G2		G3		G1		G2		G3		G1		G2		G3	
Medida	m1	m2	m1	m2	m1	m2	m1	m2	m1	m2	m1	m2	m1	m2	m1	m2	m1	m2	m1	m2	m1	m2	m1	m2
Microdureza Vickers [HV]	422	415	397	422	415	430	251	287	310	298	381	312	384	446	354	359	422	401	381	381	378	411	415	419

Ensayo	TiVw230ae0						TiVw230ae20						TiVw230ae40						TiVw230ae80					
Generatriz	G1		G2		G3		G1		G2		G3		G1		G2		G3		G1		G2		G3	
Medida	m1	m2	m1	m2	m1	m2	m1	m2	m1	m2	m1	m2	m1	m2	m1	m2	m1	m2	m1	m2	m1	m2	m1	m2
Microdureza Vickers [HV]	384	411	394	434	394	415	372	397	430	384	401	381	411	408	381	334	462	368	401	426	408	351	430	411

ANEXOS

Ensayo	TiVw460ae0						TiVw460ae20						TiVw460ae40						TiVw460ae80					
Generatriz	G1		G2		G3		G1		G2		G3		G1		G2		G3		G1		G2		G3	
Medida	m1	m2	m1	m2	m1	m2	m1	m2	m1	m2	m1	m2	m1	m2	m1	m2	m1	m2	m1	m2	m1	m2	m1	m2
Microdureza Vickers [HV]	375	419	404	401	397	430	411	467	419	419	391	327	372	408	422	378	438	442	411	446	426	446	372	454



Pliego de condiciones

PLIEGO DE CONDICIONES

Pliego de condiciones

ÍNDICE DEL PLIEGO DE CONDICIONES

1. Condiciones generales.....	300
2. Condiciones particulares.....	300
2.1. Requisitos humanos.....	300
2.2. Requisitos tecnológicos.....	301
2.3. Otros requisitos.....	303
3. Condiciones económicas.....	303
3.1. Forma de pago.....	303
3.2. Cumplimiento de los plazos y penalizaciones.....	303
3.3. Garantía.....	304
3.4. Limitación.....	304
4. Condiciones legales.....	304

PLIEGO DE CONDICIONES

1. Condiciones generales

Para la realización del presente proyecto, se necesitará un centro de investigación y desarrollo con experiencia en los campos que se tratan en este documento. Se debe contar con instalaciones y medios adecuados para realizar todo el proceso de análisis e investigación desarrollados a lo largo del trabajo.

Las partes que intervienen en el proyecto son la empresa que encarga el estudio del rectificado de titanio como contratista, en este caso, la Escuela Superior de Ingeniería, y el equipo de investigación y análisis como proyectista.

Para la ejecución del proyecto es necesaria la colaboración del personal de la empresa contratista, el grupo de investigación TEP-027 de la UCA y la aportación de los medios técnicos necesarios para poder llevar a cabo el proyecto.

2. Condiciones particulares

El proyectista debe cumplir los plazos de entrega acordados con el cliente, realizando para ello una planificación adecuada.

El proyectista deberá respetar y asegurar los requisitos técnicos y de gestión impuestos por el cliente en la entrega final, consumiendo la cantidad mínima de recursos posibles.

2.1. Requisitos humanos

Para garantizar y agilizar los plazos de entrega, se contará con la colaboración de varios integrantes del grupo de investigación TEP-027, cualificados para las tareas a realizar durante el desarrollo de este proyecto. Dada la naturaleza de cada una de las actividades a desarrollar, en las correspondientes fases del proyecto, se diferencian los siguientes perfiles profesionales necesarios para la consecución del mismo:

- Operario: persona cualificada para el mecanizado de las probetas, encargándose pues de la puesta a punto y manejo de la maquinaria empleada en este proyecto, principalmente del torno convencional y la rectificadora cilíndrica.
- Técnico metrólogo: ingeniero técnico con experiencia en el área de metrología, encargándose de las mediciones requeridas por el proyecto (microgeometría, macrogeometría y microdureza).
- Director del proyecto: ingeniero técnico con especialidad o amplios conocimientos en materiales y mecanizado de los mismos, para la creación y

PLIEGO DE CONDICIONES

ejecución de la metodología, coordinación y supervisión del proyecto y elaboración de los informes de resultados

2.2. Requisitos tecnológicos

Para llevar a cabo la elaboración del presente documento, son necesarios una serie de equipos y programas que se detallan a continuación:

Software

Para el desarrollo de este proyecto, se deberá contar con licencias para el manejo de los siguientes programas:

- Paquete Microsoft Office 2016
- Adobe Acrobat Distiller DC 2015
- Adobe Photoshop CC 2015
- Perthometer Concept

Hardware

Para la toma de imágenes se ha utilizado una cámara digital compacta *Nikon® COOLPIX S3700*.

Asimismo, para poder utilizar el software anteriormente mencionado, será necesario un equipo informático tanto para la manipulación de imágenes como para la redacción del presente proyecto.

Los requisitos mínimos del sistema para la instalación de los programas son:

- Procesador Intel® Pentium® 4 o AMD Athlon® de 64 bits.
- Sistema operativo: Windows 10/8.1/8/7.
- 1GB de RAM.
- 1GB de espacio disponible en el disco duro para la instalación; se necesita espacio libre adicional durante la instalación.
- Resolución de 1024x768 (se recomienda 1280x800) con tarjeta gráfica OpenGL cualificada y acelerada de hardware, color de 16 bits y 256MB de VRAM.

Se necesita hacer uso del equipo de medición de rugosidad superficial mediante palpador, el rugosímetro *Mahr Perthometer PGK 120*, de un equipo de medición de desviaciones dimensionales, la medidora de forma *Mahr Formtester MMQ44*, así como, de un equipo para la medición de microdureza Vickers, el microdurómetro *SHIMADZU® HMV-2ADW*, para el análisis de la micro y macrogeometría, así como microdureza, correspondientemente. A continuación se exponen las características de cada equipo:

PLIEGO DE CONDICIONES

Características del rugosímetro

- Controlado por ordenador o manualmente (software Perthometer Concept)
- Rango de medición $\pm 250 \mu\text{m}$
- Resolución 100000–200000 : 1
- Linealidad de desviación $< 1\%$
- Longitud de rastreo $\pm 500 \mu\text{m}$
- Palpador con radio de punto de $2 \mu\text{m}$ y un radio de punta de 90°
- Dimensiones 150 x 320 x 250 mm
- Cutoff disponibles 0,08 0,25 0,8 2,5 8
- El rugosímetro tiene que estar correctamente calibrado para dar validez a los resultados de los ensayos

Características de la medidora de forma

- Controlado por un ordenador
- Eje C 220 mm de diámetro
- Longitud eje Z 350 mm
- Longitud eje X 180 mm
- Dimensiones eje X 100 mm
- Error medición redondez en eje C $0,07 \mu\text{m} \pm 0,001 \mu\text{m/mm}$
- Error medición rectitud en vertical/100 mm es $0,25 \mu\text{m}$
- La medidora de forma tiene que estar correctamente calibrada para dar validez a los resultados de los ensayos.

Características del medidor de microdureza Vickers

- Controlado por un ordenador
- Dos indentadores Incorporados dos indentadores (Vickers y Knoop) cámara (zoom 40x)
- Soporte con desplazamiento en ejes X, Y y Z manual
- Longitud mínima y máxima ejes X e Y: $\pm 12,5 \text{ mm}$
- Longitud eje Z 60 mm
- Rango de medida efectivo $80 \mu\text{m}$ (V) x $100 \mu\text{m}$ (H) (con zoom 40x)
- Resolución $0,01 \mu\text{m}$
- Nueve tipos de fuerza aplicables: 98,07 245,2 490,3 980,7 mN, 1,961 2,942 4,903 9,807 y 19,614N (HV 0,01 0,025 0,05 0,1 0,2 0,3 0,5 1 y 2)
- Rango duración de carga/indentación: 5 a 999 segundos
- El medidor de microdureza tiene que estar correctamente calibrado para dar validez a los resultados de los ensayos.

PLIEGO DE CONDICIONES

2.3. Otros requisitos

La medición puede ser susceptible a algún tipo de error debido principalmente a una mala calibración del equipo utilizado. El mantenimiento de los equipos involucrado en el sistema de adquisición correrá a cargo de la empresa que realiza el proyecto.

Además, los ensayos de metrología deben darse a unas determinadas condiciones ambientales de temperatura y humedad para garantizar la calidad de los mismos. Éstas son $20\pm 1^{\circ}\text{C}$ que es la temperatura de referencia para la calibración y una humedad relativa de 50% para prevenir la corrosión, ya que la mayoría de equipos, útiles y demás se encuentran fabricados con materiales metálicos.

El laboratorio de metrología garantiza que los ensayos se han realizado bajo las condiciones anteriormente mencionadas.

3. Condiciones económicas

A continuación, se presentan una serie de condiciones relacionadas con el aspecto económico dentro de la elaboración del proyecto.

3.1. Forma de pago

El abono de los importes relativos a cada una de las fases de elaboración del presente proyecto se llevará a cabo de la siguiente manera:

- 10% de los honorarios al adjudicar el proyecto.
- 40% de los honorarios al finalizar el estudio de las posibles soluciones.
- 50% de los honorarios al finalizar el proyecto en su totalidad.

3.2. Cumplimiento de los plazos y penalizaciones

Si el cliente incurre en retraso o demoras en el incumplimiento del plazo establecido para la ejecución del contrato, se llevará a cabo la implantación de una multa equivalente al uno por ciento (1%) del valor total del apartado del presupuesto por cada día de retardo en el cumplimiento de las obligaciones, sin que el valor total del mas mismas pueda exceder en un quince por ciento (15%) del valor total del contrato. El cliente autoriza desde este momento, para que en caso de que se le imponga multas, el valor de las mismas se descuente de los saldos a su favor.

PLIEGO DE CONDICIONES

Lo anterior se lleva a cabo salvo en el caso que el cliente demuestre que su tardanza obedece a hechos de caso fortuito o por fuerza mayor debidamente comprobados o demostrados.

3.3. Garantía

El proyectista debe garantizar durante dos años, a contar desde la fecha de entrega y finalización del proyecto, solventar las deficiencias detectadas imputables a su actividad, si así se solicitase.

3.4. Limitación

El máximo importe del que dispone es de QUINCE MIL EUROS (15000€), tanto como para alquiler como para compra de los medios que fuesen necesarios para la ejecución del proyecto presentado.

Cualquier cantidad que supere la expuesta anteriormente, por demostrada y necesaria que sea, no será importada a menos que sea considerada, comunicada y aceptada por el cliente previamente al desembolso de la misma.

4. Condiciones legales

Constituye objeto del presenta documento toda las normas, reglamentos y leyes de carácter general que sean aplicables tanto en el desarrollo como en la ejecución del proyecto que se presenta.


Podrán ser causas suficientes para la rescisión del contrato las que se detallan a continuación:

- Muerte o incapacidad del cliente.
- La quiebra del cliente.
- Modificaciones sustanciales del proyecto que conlleven a la variación en más de un 20% del presupuesto contratado.
- No iniciar la ejecución del proyecto en el mes siguiente a la fecha convenida.
- Suspender o abandonar de forma injustificada por un plazo superior a dos meses.
- No incluir en los plazos establecidos o aprobados.
- Incumplimiento de las condiciones de contrato, proyecto en ejecución o determinaciones establecidas.
- Incumplimiento de la normativa vigente de Seguridad y Salud en el trabajo.

PLIEGO DE CONDICIONES

Durante la totalidad del proyecto se estará a lo dispuesto en la normativa vigente, especialmente la de obligado cumplimiento entre las que cabe destacar:

- Ley de prevención de riesgos laborales. [Ley 31/1995 Prevención de Riesgos Laborales. (BOE 10/11/95)].
- Servicios de prevención. [R.D. 39/1997. Reglamento Servicios de Prevención. (BOE 31/1/97)].
- Reglamento de seguridad en las máquinas. [R.D. 1495/86 de 26 de mayo. (BOE 21/07/1986)].
- Normas sobre la protección de los trabajadores frente a los riesgos derivados de la exposición al ruido durante el trabajo.



Estado de mediciones

Estado de mediciones

ÍNDICE DEL ESTADO DE MEDICIONES

1. Fases de desarrollo del proyecto	310
1.1. Preparación de los ensayos	310
1.2. Realización de los ensayos	310
1.3. Elaboración documento	311

ESTADO DE MEDICIONES

1. Fases de desarrollo del proyecto

A continuación, se muestra un análisis de los tiempos invertidos en la elaboración del presente proyecto por cada una de las fases en las que se ha dividido.

1.1. Preparación de los ensayos

Tabla M. 1. Recursos humanos empleados en la preparación de las probetas

Ref	Categoría	Nº Unidad	Descripción
1.1	Operario	1	Preparación de las 4 probetas, desde el corte de la barra original hasta el desbaste de las mismas. Uso de maquinaria y personal especializado.

Tabla M. 2. Tiempo de la preparación de las probetas

Ref	Nº Unidad	Unidad	Descripción
1.1	6	h	Preparación de las 4 probetas, desde el corte de la barra original hasta el desbaste de las mismas. Uso de maquinaria y personal especializado.
TOTAL	6	h	Total de la preparación de los ensayos

1.2. Realización de los ensayos

Tabla M. 3. Recursos humanos empleados en la realización de los ensayos

Ref	Categoría	NºUnidad	Descripción
2.1	Operario	1	Realización de los ensayos de torneado en seco sobre las 4 probetas. Uso del torno manual y del personal cualificado para el manejo de la maquinaria.
2.2			Realización de los ensayos de rectificado sobre las 4 probetas. Uso de la rectificadora y del personal cualificado para el manejo de la maquinaria.
2.3	Técnico Metrólogo	1	Pruebas de micro y macrogeometría, así como, microdureza. Uso de equipos y personal cualificado para su manejo

Tabla M. 4. Tiempo necesitado para la realización de los ensayos

Ref	Nº Unidad	Unidad	Descripción
2.1	4	h	Realización de los ensayos de torneado en seco sobre las 4 probetas. Uso del torno manual y del personal cualificado para el manejo de la maquinaria.

ESTADO DE MEDICIONES

2.2	7	h	Realización de los ensayos de rectificado sobre las 4 probetas. Uso de la rectificadora y del personal cualificado para el manejo de la maquinaria.
2.3	11	h	Evaluación de micro y macrogeometría, así como, microdureza. Uso de equipos y personal cualificado para su manejo
TOTAL	22	h	Total de la realización de los ensayos

1.3. Elaboración documento

Tabla M. 5. Recursos humanos empleados en la elaboración de los ensayos

Ref	Categoría	Nº Unidad	Descripción
3.1	Director de proyecto	1	Búsqueda de bibliografía (publicaciones, artículos, libros, páginas web, etc.)
3.2			Decisión de la estructura del proyecto. Redacción del documento.

Tabla M. 6. Tiempo empleado en la elaboración del documento

Ref	Nº Unidad	Unidad	Descripción
3.1	180	h	Búsqueda de bibliografía (publicaciones, artículos, libros, páginas web, etc.)
3.2	540	h	Decisión de la estructura del proyecto. Redacción del documento.
TOTAL	720	h	Total de la elaboración del documento



Presupuesto

PRESUPUESTO

Presupuesto

ÍNDICE DE LOS PRESUPUESTOS

1. Precios unitarios.....	316
2. Desglose presupuestario.....	317
2.1. Preparación de los ensayos.....	317
2.2. Realización de los ensayos.....	317
2.3. Elaboración del documento.....	317
3. Presupuesto final.....	318

PRESUPUESTO

1. Precios unitarios

Tabla P. 1. Precio unitario correspondiente a cada categoría de recurso humano necesario

Categoría	Precio unitario (€/h)
1 Director de proyecto	50,00
1 Técnico Metrólogo	25,00
1 Operario	15,00

Tabla P. 2. Precios unitarios utilizados en este proyecto

Ref.	Descripción	Categoría	Precio unitario (€/h)
1.1	Preparación de las 4 probetas, desde el corte de la barra original hasta el desbaste de las mismas. Uso de maquinaria y personal especializado.	Operario	15,00
2.1	Realización de los ensayos de torneado en seco sobre las 4 probetas. Uso del torno manual y del personal cualificado para el manejo de la maquinaria.	Operario	15,00
2.2	Realización de los ensayos de rectificado sobre las 4 probetas. Uso de la rectificadora y del personal cualificado para el manejo de la maquinaria.	Operario	15,00
2.3	Evaluación de micro y macrogeometría, así como, microdureza. Uso de equipos y personal cualificado para su manejo	Técnico Metrólogo	25,00
3.1	Búsqueda de bibliografía (publicaciones, artículos, libros, páginas web, etc.)	Director de proyecto	50,00
3.2	Decisión de la estructura del proyecto. Redacción del documento.	Director de proyecto	50,00

La determinación de estos precios unitarios se obtiene de considerar que cada actividad, correspondiente a las diferentes fases del proyecto descritas en el estado de mediciones y la Tabla P. 2, se lleva a cabo de forma secuencial y considerando que un determinado recurso humano empleado lleve a cabo, de forma paralela, dos actividades que se le encomiendan. Ejemplo de ello es el operario; hasta no haber finalizado la preparación de las probetas no podrá llevar a cabo los ensayos, siendo en este caso el torneado previo al rectificado.

PRESUPUESTO

2. Desglose presupuestario

Se realiza un desglose del presupuesto necesario para llevar a cabo cada una de las fases de desarrollo del proyecto.

2.1. Preparación de los ensayos

Tabla P. 3. Desglose presupuestario para la preparación de los ensayos

Ref	Nº Unid. (h)	Descripción	Precio unid. (€/h)	Precio total (€)
1.1	6	Preparación de las 4 probetas, desde el corte de la barra original hasta el desbaste de las mismas. Uso de maquinaria y personal especializado.	15,00	90,00
Total de la preparación de los ensayos				90,00

2.2. Realización de los ensayos

Tabla P. 4. Desglose presupuestario para la realización de los ensayos.

Ref	Nº Unid. (h)	Descripción	Precio unid. (€/h)	Precio total (€)
2.1	4	Realización de los ensayos de torneado en seco sobre las 4 probetas. Uso del torno manual y del personal cualificado para el manejo de la maquinaria.	15,00	60,00
2.2	7	Realización de los ensayos de rectificado sobre las 4 probetas. Uso de la rectificadora y del personal cualificado para el manejo de la maquinaria.	15,00	105,00
2.3	11	Pruebas de micro y macrogeometría, así como, microdureza. Uso de equipos y personal cualificado para su manejo	25,00	275,00
Total de la realización de los ensayos				440,00

2.3. Elaboración del documento

Tabla P. 5. Desglose presupuestario para la elaboración del proyecto

Ref	Nº Unid. (h)	Descripción	Precio unid. (€/h)	Precio total (€)
-----	-----------------	-------------	-----------------------	---------------------

PRESUPUESTO

3.1	180	Búsqueda de bibliografía (publicaciones, artículos, libros, páginas web, etc.)	50,00	9.000,00
3.2	540	Decisión de la estructura del proyecto. Redacción del documento.	50,00	27.000,00
Total de la elaboración del documento				36.000,00

3. Presupuesto final

Total de la preparación de los ensayos	90,00 €
Total de la realización de los ensayos	440,00 €
Total de la elaboración del documento	36.000,00 €
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN DEL MATERIAL	36.530,00 €
Gastos generales (+6%)	2.191,80 €
Beneficio industrial (+5%)	1.826,50 €
PRESUPUESTO PRO CONTRATA	40.548,30 €
IVA (+21%)	8.515,14 €
PRESUPUESTO GENERAL	49.063,44 €

El presupuesto total para la ejecución de este proyecto asciende a CUARENTA NUEVE MIL SESENTA Y TRES CON CUARENTA Y CUATRO EUROS (49.063,44 €).

